

# **ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS PARA A INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS APLICADA AO ESTUDO DA HUMIDADE**

**SOFIA ALBANA SILVA SAMPAIO PINTO**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES**

---

Orientador: Professora Doutora Eva Sofia Botelho Machado Barreira

---

Coorientador: Professora Doutora Maria de Lurdes de Oliveira Simões

JUNHO DE 2018

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2017/2018**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2014/2015 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Ao meu querido avô

*“Não tenhamos pressa, mas não percamos tempo”*

*José Saramago*



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha família por todo o apoio e carinho ao longo deste percurso. Especialmente aos meus pais, pelo investimento na minha educação, pela confiança, paciência, compreensão e sobretudo pelo amor.

Às minhas orientadoras, Professora Eva Barreira e Professora Lurdes Simões por toda a dedicação, disponibilidade e apoio no trabalho desenvolvido.

À Sofia pelos conselhos, preocupação e palavras de confiança. À Andreia, ao Pedro e ao Marcelo, por todo o incentivo, por estarem sempre presentes ao longo deste percurso e acima de tudo pela sincera amizade.



## RESUMO

A humidade afeta o comportamento dos materiais e é possivelmente uma das maiores causas da degradação dos edifícios. A humidade na construção compromete não só qualidade do ar no interior dos edifícios, como também a durabilidade dos materiais e componentes.

A termografia de infravermelhos é uma técnica não destrutiva que permite a inspeção de edifícios e, por isso, permite a prevenção de danos provocados pela água. A câmara termográfica determina a temperatura superficial de um material através da captação de radiação infravermelha e consequente conversão em sinais elétricos, obtendo-se imagens térmicas ou termogramas. As imagens térmicas, por si só, apenas permitem extrair informações qualitativas; no entanto, este estudo pretende avaliar a utilização de técnicas quantitativas para o processamento de termogramas, com a identificação e interpretação de padrões, associados a variações térmicas das imagens e, para isso, estudou-se o efeito da humidificação pelo topo e pela base de provetes de betão leve.

Inicialmente, efetuou-se um tratamento estatístico através de *boxplots*, onde foi possível observar a evolução das temperaturas ao longo das 24 horas de ensaio. Através de gráficos com a representação dos coeficientes de assimetria, identificaram-se os termogramas responsáveis pela assimetria do conjunto de dados. Por fim utilizou-se a análise de componentes principais (ACP) para reduzir a série de dados resultantes dos ensaios e estudar o fenómeno do ponto de vista espacial e temporal.

Com a análise estatística conseguiu descrever-se o comportamento das temperaturas ao longo do ensaio e identificar os períodos onde ocorreram variações mais significativas. A análise de componentes principais (ACP) permitiu perceber que, na abordagem temporal, a primeira componente principal é quase sempre a única que consegue explicar o fenómeno da humidificação. O instante inicial mostrou-se o mais interessante para identificar o nível da água no provete e o instante final permitiu definir as primeiras 8h como mais relevantes no fenómeno. O perfil posição não permitiu retirar conclusões adicionais sobre o fenómeno.

**PALAVRAS-CHAVE:** Termografia de Infravermelhos, Análise de Componentes Principais, Humidade, Análise Estatística





## ABSTRACT

Moisture affects the behavior of materials and it is possibly one of the major causes of building decay. Moisture in construction compromises not only air quality as well as the durability of materials and components.

Infrared thermography is a non-destructive technique that allows the inspection of buildings and it prevents several damages caused by the presence of water. The thermographic camera defines the surface temperature of a material through its capture of infrared radiation. Then, it turns into electrical signals, obtaining thermal images or thermograms. Thermal images only allow the extraction of qualitative information. Therefore, this study intends to evaluate the use of quantitative techniques for processing the thermograms with the identification and interpretation of patterns, associated with thermal variations of the images, caused by the absorption of water through the base and top of light concrete samples.

Initially, a statistical treatment was used with *boxplots*, where it was possible to observe the evolution of the temperatures during 24 hours of test. After that, through graphics with the representation of the coefficients of asymmetry were identified the thermograms responsible for the asymmetry of the data set. Finally, the contribution of the Principal Component Analysis (PCA) was used to reduce the data resulting from the tests and to study the phenomenon from a spatial and temporal point of view.

The statistical analysis was able to describe the behavior of the temperatures and identify the most significant periods for their variation. The Principal Component Analysis (PCA) showed that in the temporal approach the first main component is almost always the only one that can explain the phenomenon of moisture. The initial instant was the most interesting to identify the water level in the sample and the final instant allowed to define the first 8h as more relevant in the phenomenon. The profile position did not allow to draw additional conclusions about the phenomenon.

**KEYWORDS:** Infrared Thermography, Principal Component Analysis (PCA), Moisture, Statistical Analysis



## ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS .....	i
RESUMO .....	iii
ABSTRACT .....	v
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1.CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2.INTERESSE E OBJETIVOS DO TRABALHO .....	2
1.3.ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	2
<b>2 TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS E ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS.....</b>	<b>3</b>
2.1.CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	3
2.2.CONCEITOS FUNDAMENTAIS.....	4
2.2.1. TRANSMISSÃO DE ENERGIA POR RADIAÇÃO .....	4
2.2.2. MEDIÇÃO DA TEMPERATURA ATRAVÉS DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS .....	5
2.2.3. TERMOGRAFIA ATIVA E PASSIVA.....	5
2.2.5. FATORES QUE AFETAM A TERMOGRAFIA.....	7
2.3.ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS.....	8
2.3.1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	8

2.3.2. APLICAÇÃO À TERMOGRAFIA.....	9
-------------------------------------	---

## **3 METODOLOGIA..... 13**

3.1.OBJETIVOS .....	13
---------------------	----

3.2.DESCRICÃO DO ENSAIO .....	13
-------------------------------	----

3.3.TRATAMENTO DE DADOS .....	14
-------------------------------	----

3.4.ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (ACP) .....	15
---	----

## **4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS TERMOGRAMAS..... 21**

4.1.HUMIDIFICAÇÃO PELA BASE.....	21
----------------------------------	----

4.2.HUMIDIFICAÇÃO PELO TOPO.....	32
----------------------------------	----

4.3.DISSCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	42
------------------------------------	----

## **5 HUMIDIFICAÇÃO PELA BASE..... 45**

5.1.CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	45
---------------------------------	----

5.2.ABORDAGEM TEMPORAL .....	47
------------------------------	----

5.2.1. SUBTRAÇÃO DO PERFIL POSIÇÃO .....	47
--	----

5.2.2. SUBTRAÇÃO DO PERFIL INSTANTE .....	47
---	----

5.2.3. ANÁLISE DE SCORES.....	63
-------------------------------	----

5.2.4. ANÁLISE DE LOADINGS .....	65
----------------------------------	----

5.3.ABORDAGEM ESPACIAL .....	66
------------------------------	----

<b>6 HUMIDIFICAÇÃO PELO TOPO .....</b>	<b>69</b>
<b>6.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....</b>	<b>69</b>
<b>6.2. ABORDAGEM TEMPORAL .....</b>	<b>71</b>
6.2.1. SUBTRAÇÃO DO PERFIL POSIÇÃO .....	71
6.2.2. SUBTRAÇÃO DO PERFIL INSTANTE .....	72
6.2.3. ANÁLISE DE SCORES .....	83
6.2.4. ANÁLISE DE LOADINGS .....	85
 <b>7 CONCLUSÕES .....</b>	 <b>87</b>
<b>7.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>87</b>
<b>7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....</b>	<b>88</b>
 <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	 <b>89</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Provetes no interior da câmara climática.....	14
Figura 2 – Esquema para identificar as referências.....	18
Figura 3 - Legenda dos códigos das referências.....	19
Figura 4 – <i>Scree plot</i> [21].....	20
Figura 5 - <i>Boxplots</i> dos termogramas relativos às primeiras 8 horas de ensaio .....	22
Figura 6 – Evolução da mancha húmida no final das primeiras 4 horas de ensaio .....	22
Figura 7 - <i>Boxplots</i> dos termogramas relativos às segundas 8 horas de ensaio .....	23
Figura 8 <i>Boxplots</i> dos termogramas relativos às terceiras 8 horas de ensaio .....	24
Figura 9 - Representação da evolução ao longo do dia dos coeficientes de assimetria das temperaturas durante todo o ensaio .....	24
Figura 10 - <i>Boxplots</i> dos termogramas relativos às primeiras 8 horas de ensaio na metade inferior do provete.....	25
Figura 11 – <i>Boxplots</i> dos termogramas relativos às segundas 8 horas de ensaio na metade inferior do provete.....	26
Figura 12 - <i>Boxplots</i> dos termogramas relativos às terceiras 8 horas de ensaio na metade inferior do provete.....	26
Figura 13 - Representação da evolução dos coeficientes de assimetria durante todo o ensaio na metade inferior do provete .....	27
Figura 14 - Intervalos de confiança a 95% da temperatura média dos termogramas nas primeiras 4 horas de ensaio .....	28
Figura 15 - Intervalos de confiança a 95% da temperatura média dos termogramas nas segundas 4 horas de ensaio .....	28

Figura 16 - Intervalos de confiança a 95% da temperatura média dos termogramas nas segundas 8 horas de ensaio .....	29
Figura 17 – Intervalos de confiança a 95% da temperatura média dos termogramas nas terceiras 8 horas de ensaio .....	30
Figura 18 – Intervalos de confiança a 95% da temperatura média dos termogramas nas primeiras 4 horas de ensaio na metade inferior do provete .....	30
Figura 19 - Intervalos de confiança a 95% da temperatura média dos termogramas nas segundas 4 horas de ensaio na metade inferior do provete .....	31
Figura 20 - Intervalos de confiança a 95% da temperatura média dos termogramas nas segundas 8 horas de ensaio na metade inferior do provete .....	32
Figura 21 - Intervalos de confiança a 95% da temperatura média dos termogramas nas terceiras 8 horas de ensaio na metade inferior do provete .....	32
Figura 22 - <i>Boxplots</i> dos termogramas relativos às primeiras 8 horas de ensaio .....	33
Figura 23 - <i>Boxplots</i> dos termogramas relativos às segundas 8 horas de ensaio .....	34
Figura 24 – <i>Boxplots</i> dos termogramas relativos às terceiras 8 horas de ensaio .....	34
Figura 25 - Representação da evolução ao longo do dia dos coeficientes de assimetria das temperaturas durante todo o ensaio .....	35
Figura 26 - <i>Boxplots</i> dos termogramas relativos às primeiras 8 horas de ensaio na metade superior do provete .....	36
Figura 27 - <i>Boxplots</i> dos termogramas relativos às segundas 8 horas de ensaio na metade superior do provete .....	36
Figura 28 - <i>Boxplots</i> dos termogramas relativos às terceiras 8 horas de ensaio na metade superior do provete .....	37
Figura 29 - Representação da evolução dos coeficientes de assimetria durante todo o ensaio na metade superior do provete .....	37
Figura 30 - Intervalos de confiança a 95% da temperatura média dos termogramas nas primeiras 4 horas de ensaio .....	38



Figura 31 - Intervalos de confiança a 95% da temperatura média dos termogramas nas segundas 4 horas de ensaio .....	39
Figura 32 - Intervalos de confiança a 95% da temperatura média dos termogramas nas segundas 8 horas de ensaio .....	39
Figura 33 - Intervalos de confiança a 95% da temperatura média dos termogramas nas terceiras 8 horas de ensaio .....	40
Figura 34 - Intervalos de confiança a 95% da temperatura média dos termogramas nas primeiras 4 horas de ensaio na metade superior do provete .....	40
Figura 35 - Intervalos de confiança a 95% da temperatura média dos termogramas nas segundas 4 horas de ensaio na metade superior do provete .....	41
Figura 36 - Intervalos de confiança a 95% da temperatura média dos termogramas nas segundas 8 horas de ensaio na metade superior do provete .....	41
Figura 37 - Intervalos de confiança a 95% da temperatura média dos termogramas nas terceiras 8 horas de ensaio na metade superior do provete .....	42
Figura 38 - Representação dos <i>boxplots</i> dos perfis instante de referência da humedificação pela base.....	46
Figura 39 - Representação dos <i>boxplots</i> dos perfis posição de referência da humedificação pelo topo.....	46
Figura 40 – CP1 da subtração de uma posição da base (a), média (b) e do topo (c) às restantes posições .....	47
Figura 41 - CP1 (a), CP2 (b), CP3 (c), CP4 (d) da subtração do termograma final aos termogramas das 24 horas (BTI <sub>0-24f</sub> ) .....	48
Figura 42 - Variância explicada pelas CPs (BTI <sub>0-24f</sub> ) .....	49
Figura 43 - CP1 (a) e CP2 (b) da subtração do termograma inicial aos termogramas das 24 horas (BTI <sub>0-24i</sub> ) .....	49
Figura 44 - Variância explicada pelas CPs (BTI <sub>0-24i</sub> ) .....	50

Figura 45 - CP1 (a), CP2 (b), CP3 (c), CP4 (d), CP5 (e), CP6 (f), CP7 (g), CP8 (h) e CP9 (i) da subtração do perfil instante médio aos termogramas das 24 horas (BTI <sub>0-24m</sub> ) .....	51
Figura 46 - Variância explicada pelas CPs (BTI <sub>0-24m</sub> ) .....	51
Figura 47 – CP1 (a) e CP2 (b), da subtração do termograma final aos termogramas das primeiras 8 horas (BTI <sub>0-8f</sub> ) .....	52
Figura 48 - Variância explicada pelas CPs (BTI <sub>0-8f</sub> ) .....	52
Figura 49 - Representação dos <i>boxplots</i> dos termogramas das primeiras oito horas e do último termograma (T193) .....	53
Figura 50 - CP1 (a) e CP2 (b), da subtração do termograma inicial aos termogramas das primeiras 8 horas (BTI <sub>0-8i</sub> ) .....	53
Figura 51 - Variância explicada pelas CPs (BTI <sub>0-8i</sub> ) .....	54
Figura 52 - CP1 (a), CP2 (b), CP3 (c) e CP4 (d) da subtração do perfil instante médio aos termogramas das primeiras 8 horas (BTI <sub>0-8m</sub> ) .....	55
Figura 53 - Variância explicada pelas CPs (BTI <sub>0-8m</sub> ) .....	55
Figura 54 – CP1 (a) e CP2 (b) da subtração do termograma final aos termogramas das segundas 8 horas (BTI <sub>8-16f</sub> ) .....	56
Figura 55 - Variância explicada pelas CPs (BTI <sub>8-16f</sub> ) .....	56
Figura 56 - CP1 da subtração do termograma inicial aos termogramas das segundas 8 horas (BTI <sub>8-16i</sub> ) .....	57
Figura 57 - CP1 (a) e CP2 (b) da subtração do perfil instante médio aos termogramas das segundas 8 horas (BTI <sub>8-16m</sub> ) .....	57
Figura 58 - Variância explicada pelas CPs (BTI <sub>8-16m</sub> ) .....	58
Figura 59 - CP1 da subtração do termograma final aos termogramas das terceiras 8 horas (BTI <sub>16-24f</sub> ) .....	58
Figura 60 - CP1 da subtração do termograma final aos termogramas das terceiras 8 horas (BTI <sub>16-24i</sub> ) .....	59

Figura 61 - CP1 da subtração do perfil instante médio aos termogramas das terceiras 8 horas (BTI <sub>16-24m</sub> ) .....	59
Figura 62 - CP1 da ACP aplicada aos termogramas originais .....	62
Figura 63 - Representação dos <i>scores</i> da primeira componente principal em função da segunda(a), terceira(b) e quarta(c) componente principal resultante da subtração do termograma final aos termogramas das 24 horas (BTI <sub>0-24f</sub> ) .....	64
Figura 64 - Representação dos <i>scores</i> da primeira componente principal em função da segunda, resultante da subtração do termograma inicial aos termogramas das 24 horas (BTI <sub>0-24i</sub> ).....	64
Figura 65 – Representação dos <i>loadings</i> do termograma final subtraído às primeiras 8 horas(a); do termograma inicial subtraído às primeiras 8 horas(b) .....	66
Figura 66 - Representação dos <i>boxplots</i> dos perfis instante de referência .....	70
Figura 67 - Representação dos <i>boxplots</i> dos perfis posição de referência .....	70
Figura 68 – CP1 (a) e CP2 (b) da subtração de uma posição da base às restantes posições (TTP <sub>b</sub> ) .....	71
Figura 69 - Variância explicada pelas CPs (TTP <sub>b</sub> ).....	72
Figura 70 - CP1 (a), CP2 (b), CP3 (c) e CP4 (d) da subtração do termograma final aos termogramas das 24 horas (TTI <sub>0-24f</sub> ) .....	73
Figura 71 - Variância explicada pelas CPs (TTI <sub>0-24f</sub> ).....	73
Figura 72 – CP1 (a) e CP2 (b) da subtração do termograma inicial aos termogramas das 24 horas (TTI <sub>0-24i</sub> ).....	74
Figura 73 - Variância explicada pelas CPs (TTI <sub>0-24i</sub> ).....	74
Figura 74 - CP1 (a) e CP2 (b) da subtração do termograma final aos termogramas das primeiras 8 horas (TTI <sub>0-8f</sub> ) .....	75
Figura 75 - Variância explicada pelas CPs (TTI <sub>0-8f</sub> ) .....	75
Figura 76 - CP1 (a) e CP2 (b) da subtração do termograma inicial aos termogramas das primeiras 8 horas (TTI <sub>0-8i</sub> ).....	76

Figura 77 - Variância explicada pelas CPs ( $TTI_{0-8i}$ ) .....	76
Figura 78 - CP1 (a) e CP2 (b) da subtração do termograma final aos termogramas das segundas 8 horas ( $TTI_{8-16f}$ ) .....	77
Figura 79 - Variância explicada pelas CPs ( $TTI_{8-16f}$ ).....	77
Figura 80 - CP1 da subtração do termograma inicial aos termogramas das segundas 8 horas ( $TTI_{8-16i}$ ) .....	77
Figura 81 - CP1(a), CP2(b) e CP3 (c) da subtração do perfil instante médio aos termogramas das segundas 8 horas ( $TTI_{8-16m}$ ) .....	78
Figura 82 - Variância explicada pelas CPs ( $TTI_{8-16m}$ ).....	78
Figura 83 - CP1 da subtração do termograma final aos termogramas das terceiras 8 horas ( $TTI_{16-24f}$ ) .....	79
Figura 84 - CP1 da subtração do termograma inicial aos termogramas das terceiras 8 horas ( $TTI_{16-24i}$ ).....	79
Figura 85 - CP1 da subtração do perfil instante médio aos termogramas das terceiras 8 horas ( $TTI_{16-24m}$ ) .....	80
Figura 86 - CP1 (a) e CP2 (b) da ACP aplicada aos termogramas originais.....	83
Figura 87 - Representação dos <i>scores</i> da primeira componente principal em função da segunda, resultante da subtração da posição base às restantes posições ( $TTI_b$ ) .....	84
Figura 88 - Representação dos <i>scores</i> da primeira componente principal em função da segunda(a), terceira(b) e quarta(c), resultante da subtração do termograma final aos termogramas das 24 horas ( $TTI_{0-24f}$ ) .....	84
Figura 89 - Representação dos <i>scores</i> da primeira componente principal em função da segunda, resultante da subtração do termograma inicial aos termogramas das 24 horas ( $TTI_{0-24i}$ ) .....	85
Figura 90 - Representação dos <i>loadings</i> do termograma final subtraído às primeiras 8 horas(a); do termograma inicial subtraído às primeiras 8 horas(b) .....	86

## **ÍNDICE DE QUADROS**

Quadro 1 - Primeira componente principal considerando todos os perfis instante da humedificação pela base .....	61
Quadro 2 – Número de componentes principais e respetiva variância explicada .....	63
Quadro 3 – Primeira componente principal considerando todos os perfis instante da humedificação pelo topo .....	81
Quadro 4 – Número de componentes principais e respetiva variância explicada .....	82



# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As patologias dos edifícios têm merecido uma atenção crescente nos últimos anos, com atuações tanto ao nível da legislação como na certificação e desenvolvimento de novas técnicas e produtos. O aumento significativo do consumo de energia devido a certas patologias é um problema que carece de controlo, uma vez que é necessário atender às exigências de conforto higrotérmico, para garantir a durabilidade e segurança dos edifícios.

As variações de temperaturas em materiais de construção podem ser avaliadas através da medição da sua temperatura contribuindo para a compreensão das causas dos danos. A termografia de infravermelhos é uma técnica eficaz que permite determinar a temperatura superficial dos objetos, com aplicações em vários domínios.

A termografia de infravermelhos é um método não destrutivo que permite a realização de ensaios sem implicar o contacto com estes. Com uma câmara termográfica capta-se a radiação infravermelha emitida por cada objeto e converte-se em sinais elétricos, originando uma imagem térmica ou termograma, com as distribuições das temperaturas superficiais, de acordo com uma escala de cores associada a temperaturas. Esta técnica permite uma análise qualitativa através da identificação de defeitos e anomalias, possibilitando o reconhecimento do estado de degradação de elementos construtivos e diversos materiais, não só no domínio da engenharia civil.

A humidade nos elementos construtivos é uma das causas mais significativas das patologias, que afeta o desempenho das construções. A compreensão dos fenómenos de humedificação através da termografia permite a identificação de padrões térmicos que revelam as áreas afetadas pela presença da água. No entanto, é necessário recorrer a técnicas quantitativas para uma análise mais profunda e com mais detalhe da informação, como a identificação do nível atingido pela água. Por isso, revela-se fundamental recorrer a técnicas de tratamento quantitativo como uma análise estatística simples dos dados e à análise de componentes principais (ACP).

## 1.2. INTERESSE E OBJETIVOS DO TRABALHO

O principal objetivo desta dissertação foi a aplicação da ACP como metodologia de tratamento de imagens térmicas de provetes de betão leve humidificadas durante 24 horas, de forma a avaliar a variabilidade espacial e temporal dos termogramas e identificar os períodos mais significativos do ensaio. Para tal foram definidos os seguintes objetivos parciais:

- Revisão da literatura para conhecer os fundamentos, fenómenos, metodologias e trabalhos realizados que utilizaram a análise de componentes principais (ACP) como forma de tratamento dos termogramas;
- Realização de uma análise estatística aos termogramas que resultaram durante o ensaio de humidificação pela base e pelo topo, para estimar algumas das características;
- Aplicação da ACP aos termogramas de forma a avaliar diferentes tipos de abordagens (espacial e temporal) para descrever o fenómeno, adotando instantes e posições de referência.

## 1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A presente dissertação encontra-se organizada em sete capítulos, cujo conteúdo se descreve de seguida.

- No primeiro capítulo, realiza-se uma introdução ao trabalho, referindo o seu intuito, os objetivos, a sua estrutura e organização.
- No segundo capítulo descrevem-se os princípios fundamentais relacionados com a termografia de infravermelhos (TIV), como os processos de transmissão de energia por radiação e os diversos fatores que podem influenciar a sua medição. Também se inclui nesse capítulo os processos de aplicação da TIV à humidade. Seguidamente incluem-se os fundamentos teóricos e a aplicação da termografia à análise de componentes principais (ACP).
- No terceiro capítulo refere-se a descrição do ensaio dos provetes de betão que serviu de base para a presente dissertação e o procedimento do tratamento de dados, designadamente a metodologia do tratamento estatístico dos termogramas e da análise de componentes principais.
- No quarto capítulo encontram-se os resultados da análise estatística dos termogramas resultantes da humidificação pelo topo e pela base, assim como uma interpretação do tratamento dos dados.
- No quinto capítulo inclui-se a apresentação e interpretação dos mapas de cores e respetivos *scores* e *loadings* das componentes principais, resultantes da análise de componentes principais aplicada à humidificação da base.
- No sexto capítulo, à semelhança do capítulo anterior, encontra-se a apresentação e interpretação dos mapas de cores e respetivos *scores* e *loadings* das componentes principais, resultantes da análise de componentes principais aplicada à humidificação do topo.
- No sétimo capítulo apresentam-se as conclusões desta dissertação e referem-se eventuais desenvolvimentos futuros que podem contribuir para o enriquecimento do tema.



## 2

# TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS E ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS

### 2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A presença de água nas estruturas, assim como as suas mudanças de estado (líquido, sólido ou vapor), resultantes de infiltrações da água da chuva, condensações e também por humidade ascensional, conduzem a danos. A humidade presente nos materiais pode originar a sua degradação, devido a fenómenos físicos e químicos que ocorrem no seu interior, potenciando também o crescimento de bactérias, algas, fungos e líquenes. O fenómeno afeta também o conforto interior dos edifícios e a saúde dos seus ocupantes, assim como conduz a um aumento da necessidade de energia para o aquecimento da edificação, devido à elevada condutibilidade térmica dos materiais húmidos.

Assim, prevê-se uma necessidade de prevenção da degradação e manutenção dos edifícios, com o intuito de evitar problemas devidos à presença da água. No entanto, a medição dos valores de humidade dos materiais e elementos construtivos é um processo complexo e indireto, efetuado com base na massa, condutividade elétrica, absorção de ondas eletromagnéticas em bandas específicas, velocidade de propagação de ondas elásticas, constante dielétrica do material e ressonância magnética dos átomos de hidrogénio [1]. Por isso, existe uma dificuldade acrescida em definir a humidade, também justificada pelo facto de o seu teor variar com a profundidade, dado que elementos com diferentes espessuras possuem diferentes níveis de humidade [1].

A termografia de infravermelhos (TIV) é uma técnica de diagnóstico, que pode ser aplicada em diferentes domínios, nomeadamente na medicina, arqueologia, artes, agricultura, meteorologia e instalações elétricas. Quando aplicada aos edifícios, permite detetar diferentes anomalias presentes nas fachadas [2], estruturas e acabamentos interiores, e avaliar o seu desempenho. A TIV possibilita uma análise térmica, que permite localizar a presença de água, devido ao facto de o teor de água de um material estar fortemente relacionado com a sua temperatura superficial [2, 3].

## 2.2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS

### 2.2.1. TRANSMISSÃO DE ENERGIA POR RADIAÇÃO

A termografia de infravermelhos (TIV) permite a realização de ensaios não destrutivos, com a capacidade de inspecionar materiais sem necessidade de contacto, com rapidez e facilidade, em superfícies com áreas elevadas [4].

A transferência de energia por condução ou convecção obriga à existência de um meio físico para se propagar; no entanto, a transferência por radiação não precisa, sendo mais eficiente a sua propagação no vácuo [5]. Todos os objetos com temperatura superior a zero graus Kelvin emitem radiação [6], na zona do infravermelho, na banda do espectro eletromagnético entre 0,74 e 1000  $\mu\text{m}$  [7]. A transmissão de energia de um objeto associada a essa radiação, com um determinado comprimento de onda, é descrita pela lei de Planck. Com a integração dessa lei é possível determinar a radiação total emitida por um corpo a uma determinada temperatura - lei de Stefan Boltzmann - e, por isso, a intensidade da radiação emitida está relacionada com a temperatura do objeto e com as características da sua superfície. Um corpo que emita toda a radiação que sobre ele incide, para qualquer comprimento de onda, designa-se por corpo negro [8]. Um objeto real apenas tem a capacidade de emitir uma fração da radiação emitida por um corpo negro, nas mesmas condições de temperatura e com o mesmo comprimento de onda, uma vez que para além de absorvida, a radiação também é refletida e transmitida [8].

A emissividade descreve-se como a razão entre a energia emitida por um corpo e a energia emitida por um corpo negro, e os seus valores oscilam entre 0 e 1 [6]. Segundo a lei de Kirchhoff, quando em equilíbrio térmico e para o mesmo comprimento de onda, a energia emitida por um corpo é igual à energia por ele absorvida, ou seja, a sua emissividade e coeficiente de absorção são iguais.

A câmara termográfica, através dos seus sensores, capta diferentes níveis de radiação infravermelha invisível ao olho humano, que é irradiada pelas superfícies dos objetos, e converte-a em uma imagem visível [9]. Essa imagem, que se designa por termograma, é usada para avaliar os padrões térmicos do objeto, que dependem da distribuição da temperatura superficial [9], isto é, nas imagens térmicas, superfícies com diferentes temperaturas emitem radiação com diferente quantidade de energia, que é representada com cores distintas. Essa representação gráfica de estados térmicos de um objeto permite uma análise qualitativa, uma vez que apenas se podem distinguir as superfícies mais quentes das mais frias. Para ser possível determinar a temperatura exata, com a finalidade de assegurar uma análise quantitativa, é necessário conhecer a emissividade das superfícies. Com a emissividade, a temperatura é calculada aplicando a lei de Stefan-Boltzmann [6].

### 2.2.2. MEDIÇÃO DA TEMPERATURA ATRAVÉS DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS

A performance da câmara de infravermelhos é avaliada em termos de sensibilidade térmica, rapidez de processamento da imagem, resolução da imagem e intensidade da resolução [8] e as imagens térmicas são obtidas mantendo numa posição fixa a câmara de infravermelhos, captando uma sequência de imagens sempre da mesma área de observação durante o ensaio. Cada pixel da imagem representa uma temperatura através de uma cor.

A TIV permite a visualização de singularidades térmicas num objeto através de uma sequência de termogramas, que ilustram a variabilidade de temperatura em função do tempo ou frequência [10]. As temperaturas associadas a cada termograma e a sua variação no espaço e no tempo, são capazes de descrever qualitativamente um objeto. Assim, esta técnica visual permite diagnosticar patologias em materiais e componentes construtivos, detetar humidade e investigar o desempenho térmico e a eficiência energética de edifícios (perdas de calor em paredes e coberturas por falta de isolamento, pontes térmicas e fugas de ar e de água) [1].

Com uma inspeção recorrendo à TIV, o aumento da humidade no elemento construtivo pode ser detetado antes de serem visíveis quaisquer sinais [9], pela variação da temperatura superficial nas zonas afetadas. Estas variações podem resultar do facto da evaporação ser uma reação endotérmica e da humidade alterar a capacidade de armazenamento de calor e/ou fazer variar a resistência térmica.

No entanto, subsiste uma dificuldade devida à existência de sinais térmicos designados por ruído, aglomerados à informação, que dificultam a extração de conclusões acerca das imagens térmicas quando analisadas em bruto e que podem conduzir a falsas conclusões, sendo por isso necessário recorrer a um processamento mais complexo. O processamento automático das imagens térmicas através da aplicação de métodos estatísticos nos dados registados pela TIV tem vindo a ser utilizado por diversos autores com o objetivo de detetar defeitos. A análise de componentes principais é um dos métodos estatísticos que tem sido mais utilizado.

A TIV apresenta vantagens relativamente a outras técnicas como ultrassom e radiografia, uma vez que o processamento é mais fácil e rápido; no entanto, a técnica também possui limitações ao nível da profundidade dos defeitos que é capaz de caracterizar, sendo apenas possível detetar anomalias com espessura reduzida [11], devido ao facto de variações pequenas de temperatura não serem detetadas.

### 2.2.3. TERMOGRAFIA ATIVA E PASSIVA

Nos estudos termográficos existem duas abordagens possíveis: a termografia passiva ou a termografia ativa.

Na termografia passiva a fonte de calor é proveniente de condições naturais ou ambientais, não se recorrendo a nenhum equipamento para o aquecimento da zona em estudo. A transferência de calor ocorre naturalmente devido ao efeito da radiação solar, da temperatura ambiente e do vento, que provocam alterações na temperatura superficial e, por esse motivo, o fluxo de calor que atravessa o objeto deve-se à diferença de temperatura entre os materiais e ambiência [9].

Quando aplicada a termografia passiva ao estudo da humidade em elementos construtivos, alguns autores referem que os ganhos solares evidenciam a sua presença, aumentando as diferenças de temperatura superficiais entre a zona seca e a zona húmida e, por isso, amplia a capacidade de caracterização dos defeitos [12].

Já a termografia ativa necessita de estimulação de calor, garantida por fontes de energia provenientes de origens externas ou internas. As fontes artificiais externas excitam a superfície e são propagadas por todo o material, sendo constituídas por sistemas óticos como flashes fotográficos (para aquecimento pulsado) ou lâmpadas de halogéneo (destinadas a um aquecimento periódico) [7]. A termografia de amplitude moderada (*lock in thermography*), em que a superfície de um objeto é iluminada por um raio de *laser* de intensidade moderada (provocando ondas térmicas) e a termografia pulsada (*pulsed thermography*), quando a superfície do material é sujeita a um impulso de calor, são as técnicas óticas que aplicam o sinal aos materiais. A energia excitada é captada por uma câmara de infravermelhos ao longo do tempo do ensaio e a precisão da análise depende da frequência de estimulação. Este tipo de fontes necessita de proximidade com a zona de inspeção e as imagens térmicas são obtidas durante e depois do período de aquecimento artificial. Quando a origem da fonte de calor é interna, a energia é induzida apenas nos defeitos do material, alcançada por meio da oscilação das partículas, sem provocar o aquecimento da superfície, através de um sistema sónico ou ultrassónico. A vibrotermografia utiliza as ondas ultrassónicas para excitação interna, que pode ser de amplitude moderada (*Lock-in Vibrothermography*) ou por impulso (*Burst Vibrothermography*) [7].

#### 2.2.4. TERMOGRAFIA QUANTITATIVA E QUALITATIVA

A termografia de infravermelhos permite a obtenção de imagens térmicas em tempo real. No entanto, com uma observação visual dos termogramas, a técnica apenas permite diferenciar padrões de temperatura. Daí que só seja possível avaliar qualitativamente as características do objeto em estudo. Segundo Ferreira [13], o recurso à termografia permitiu estimar aproximadamente os tempos de secagem de uns provetes de betão leve mas, para isso, foi necessário um tratamento posterior dos dados.

Há assim necessidade de aumentar a precisão dos resultados obtidos pela câmara de infravermelhos e, para isso, é indispensável analisar e interpretar esses dados com métodos que permitam extrair conclusões quantitativas. Com a abordagem quantitativa, que recorre à aplicação de métodos estatísticos

aos valores das temperaturas que derivam das imagens térmicas, é possível melhorar a qualidade da informação, assim como obter conclusões mais fundamentadas.

Com uma análise estatística descritiva e através da aplicação de estatísticas de ordem superior, pode obter-se o coeficiente de assimetria ou o coeficiente de achatamento, identificando a variabilidade da informação. Uma análise através de índices térmicos permite estabelecer relações importantes entre os dados, nomeadamente determinar a variação da temperatura na zona danificada e na não danificada, ao longo do ensaio. A subtração de imagens a uma imagem de referência, permite uma identificação de ligeiras alterações de temperatura entre as imagens térmicas, possibilitando a exclusão de fatores externos que influenciem os termogramas, como reflexões ambientais e variações na emissividade da superfície. A subtração de imagens consecutivas auxilia na observação de ocorrências causadas por fenómenos momentâneos [1, 14, 15].

#### 2.2.5. FATORES QUE AFETAM A TERMOGRAFIA

O estudo da humidade associado à termografia de infravermelhos requer uma análise aprofundada, devido à existência de alguns fatores capazes de influenciar as imagens térmicas e, por isso, pode conduzir a falsos resultados. Por vezes, a identificação de padrões térmicos não está relacionada com as variações de temperatura e há uma necessidade de atribuir um significado a tais ocorrências. Alguns fenómenos como a diminuição da resistência térmica, aumento da capacidade de armazenamento de calor do material húmido e o seu arrefecimento por evaporação estão dependentes das características dos próprios materiais e das condições climáticas. Como também já referido, a sensibilidade da câmara pode captar características nos termogramas, provenientes de fatores externos. Assim, segundo Lerma *et al.* [2], a existência de alguns erros nas imagens está associada a:

- Reflexões causadas por raios solares;
- Ângulo entre a câmara e o objeto inspecionado;
- Diferente emissividade dos materiais;
- Efeito de sombra provocado por outros objetos;
- Diferentes comportamentos dos materiais relacionados com a cor e tipo de acabamento.

É importante também referir que a emissividade e refletividade do objeto em estudo, ou dos objetos nas proximidades, podem afetar a informação [9]. Também a radiação ambiente (direta ou refletida) que chega à câmara pode causar distorções nos resultados obtidos, principalmente se a distância entre a câmara e a superfície em estudo for elevada. A emissividade permite estimar a temperatura superficial do objeto, daí que seja necessário utilizar um valor preciso para a medição. A temperatura ambiente e atmosférica, a humidade relativa, o vento e distância da câmara ao objeto, também são fatores que podem interferir na obtenção de uma imagem térmica fiável, pelo que estes fatores deverão ser tidos em conta durante o ensaio e no processamento das imagens térmicas.

## 2.3. ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS

### 2.3.1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A observação visual de uma sequência de imagens térmicas de um objeto, registada por uma câmara de infravermelhos, possibilita o reconhecimento de anomalias, no caso de existirem. No entanto, para ser possível uma caracterização aprofundada, com avaliação quantitativa, o processo de análise tem de ser mais complexo, sendo necessário um processamento eficiente do conjunto das imagens.

Quando aplicada à termografia, a análise de componentes principais (ACP) permite reduzir o número de imagens térmicas captadas de forma a evidenciar as anomalias. O conjunto de termogramas é muitas vezes composto por uma quantidade de informação excessiva sobre as características dos objetos, que está a distorcer a informação significativa sobre o objeto em estudo [16], que pode ser redundante e desnecessária (daí designar-se como ruído).

Esta análise multivariada permite a redução de um grupo de variáveis correlacionadas entre si [17], através da formação de novos parâmetros que representam melhor as características dos objetos, resultantes da combinação linear das variáveis originais. A construção de um novo conjunto de funções ortogonais estatísticas promove uma representação compacta da informação original, derivando variáveis não relacionadas entre si [2]. Desta forma, ocorre uma redução dimensional dos dados originais, devido à sua projeção num espaço de menor dimensão. Assim, os dados da sequência de termogramas em 3D necessitam de ser convertidos para uma matriz 2D. Este método estatístico integra uma decomposição dos valores singulares de uma matriz [11], definido pela seguinte equação:

$$A = USV^T \quad (2.1)$$

Se  $m > n$ ,  $A$  representa uma matriz de ordem  $m \times n$ ,  $U$ , uma matriz  $m \times n$ ,  $S$ , uma matriz diagonal  $n \times n$  com valores positivos ou zeros que representam os valores singulares da matriz  $A$ , e  $V^T$  é a transposta de uma matriz  $n \times n$  [11, 14, 17]. Esta técnica tem a capacidade de transformar algebricamente um conjunto de variáveis aleatórias, num conjunto de variáveis não correlacionadas e ortogonais entre si, resultando nas componentes principais (CPs). O número de componentes principais obtidas neste processo é, no máximo, igual ao número de variáveis originais.

De acordo com Edis *et al.* [12], as primeiras componentes principais fornecem uma descrição sobre as variações espaciais e temporais mais significantes dos dados originais. A primeira componente principal evidencia as características de um objeto e associa-as com a sua aquisição no tempo; já a segunda CP caracteriza os defeitos dos dados desfasados no tempo e com variações de temperatura menos significativas.

Quando existem elevados gradientes de humidade, esta análise estatística é um método simples e eficaz, não só porque permite aumentar a visibilidade de áreas com maior teor de água, mas também permite

determinar as zonas com a maior velocidade de arrefecimento [14]. Com a análise de componentes aplicada à termografia de infravermelhos é possível visualizar processos de evaporação de humidade e relacioná-los com o tempo, devido à existência de contraste térmico e padrões característicos da humidade. Esta técnica tem grande potencial para detetar alterações de humidade e eliminar falsas indicações causadas por reflexões e sombras, produzindo mapas de humidade com a informação dos dados originais. No entanto, o processo necessita de conhecimento sobre os materiais e estruturas para evitar falsas conclusões.

### 2.3.2. APLICAÇÃO À TERMOGRAFIA

A análise de componentes principais aplicada à termografia de infravermelhos é uma área com desenvolvimento crescente, com aplicações reais testadas por alguns autores. A temperatura superficial de vários objetos permite uma análise quantitativa das suas singularidades e, por isso, esta técnica pode ser aplicada em vários domínios. Atualmente existem várias publicações com diferentes contextos de aplicação deste método estatístico. Desenvolveram-se estudos relativamente a humidades, defeitos e componentes elétricos.

O controlo de humidade num elemento construtivo permite evitar a sua degradação. As tensões exercidas pela cristalização do sal nas superfícies dos materiais, originadas pela presença da água e posterior-evaporação, são um fenómeno prejudicial para os edifícios. Grizato *et al.* [1], através da aplicação da ACP a um conjunto de termogramas que evidenciavam a existência de humidade numa parede, demonstrou que é possível localizar pontos onde a temperatura superficial é mais reduzida, identificar regiões onde a velocidade de evaporação possui mais variação e, ainda, distinguir as variações de temperatura devido à evaporação das que são provocadas pela variação da temperatura ambiente. Lerma *et al.* [2] investigou os diferentes comportamentos térmicos, numa área da fachada do castelo de Arenberg, de massas molhadas e de massas secas, provocados pelas flutuações de temperatura do dia e da noite. ACP facilitou a extração de informação e possibilitou a identificação dos materiais com maior variação térmica e baixa efusividade térmica e, ainda, as áreas com maior insolação, apenas com a primeira componente principal. Com as restantes componentes foi possível excluir da análise zonas de sombra, identificar diferenças pouco significativas da temperatura e localizar fendas e descontinuidades.

O reconhecimento e localização de defeitos em elementos construtivos e materiais é a área onde mais se aplica a ACP para a interpretação das imagens térmicas, visto que a maior parte da bibliografia neste âmbito aborda este tipo de anomalias. Nestes estudos, os defeitos podem ser introduzidos artificialmente em provetes para estudo em laboratório (defeitos simulados), mas também existem trabalhos desenvolvidos *in situ*. Os defeitos simulados pretendem representar imperfeições com diferentes profundidades e geometrias, com o intuito de testar a capacidade da análise de componentes principais, aplicada às imagens térmicas recolhidas, e identificar essas irregularidades.

Marrinetti *et al.* [18] demonstrou o interesse desta técnica numa amostra de aço, com orifícios numa das faces para simular perda de material devido à corrosão, com diferentes profundidades, mas todas com a mesma geometria. O objetivo deste trabalho foi evidenciar que as primeiras três componentes principais são portadoras de 87,5 % da variância e que, ao contrário da primeira componente principal, a segunda e a terceira CP apresentam os valores mais elevados da temperatura nas áreas com defeitos quando comparadas com as zonas sem defeitos.

Rajic [11] pretendeu estimar em materiais compósitos a profundidade de defeitos com secções circulares, com diâmetros distintos, com *teflon*. Com excitação através de termografia pulsada obteve as imagens térmicas e aplicou a análise de componentes principais, o que permitiu a verificação dos contrastes térmicos no material e, por isso, foi possível uma caracterização básica da profundidade das anomalias, assim como identificar os diferentes diâmetros das imperfeições.

Swita e Suszynski [16], com a excitação de um disco de alumínio com diferentes perfurações simuladas, obtiveram uma sequência de termogramas e aplicaram a ACP, com o objetivo de alcançar uma concentração da informação num número mais reduzido de variáveis do que as iniciais. Esta análise demonstrou que as primeiras três componentes principais estão associadas a singularidades do material e as restantes apenas possuem informação com mais ruído. Por isso, concluiu-se que a concentração da informação nas componentes principais depende da diversidade das características do material e que esta análise permite um reconhecimento de particularidades do material.

Na inspeção à qualidade de painéis sanduíche também é utilizada a ACP. Através do processamento de um vídeo, obtido com uma câmara de infravermelhos, combinada com uma excitação térmica com lâmpadas de halogéneo, Griefahn *et al* [17], efetuaram uma inspeção automatizada destes elementos. Através da análise de componentes principais foi possível identificar numa estrutura os componentes sanduíche, assim como os limites ideais para a frequência de excitação que permitem evitar o ruído indesejado na sequência de termogramas obtidos.

Marinetti *et al.* [19], com o objetivo de identificar defeitos e estimar as suas características geométricas, numa amostra de uma laje com três orifícios com profundidades variadas, analisaram a informação registada com ACP. Nas primeiras três componentes principais foi possível observar a maior variação de temperatura, visto que essas componentes são responsáveis por 95 % da variância total. Identificaram ainda um padrão anormal numa das componentes, frequente em algumas análises, que resulta de um erro no funcionamento da câmara. Assim, neste estudo, foi possível reconhecer as áreas que estão relacionadas com defeitos.

A determinação de áreas afetadas pela humidade em num edifício em Lisboa com fachada em revestimento cerâmico vidrado, foi um estudo desenvolvido por Edis *et al.* [12, 14]. Os defeitos *in situ* estavam relacionados com destacamentos de ladrilhos cerâmicos associados à presença de humidade, tendo sido avaliada a evolução da temperatura superficial ao longo do tempo e feito o processamento do



conjunto das temperaturas com ACP. Para se determinar as maiores variações de temperatura numa região de interesse na fachada, a análise realizou-se em três períodos de estudo: (i) período de ganhos solares e convectivos; (ii) períodos de perda de calor; (iii) todo o período de tempo de análise. As diferenças de temperatura mais acentuadas identificaram as áreas críticas e a primeira componente principal revelou um aumento de temperatura no período de ganhos solares, tanto nas áreas com anomalias como nas restantes; no entanto, o incremento nas duas zonas não é o mesmo. Já no período de perda de calor, tanto a primeira como a segunda componente principal são significativas e a evolução da temperatura é homogénea para todas as áreas. Com este estudo, os autores verificaram que a aplicação da análise de componentes principais tem a capacidade de detetar o aumento de humidade e problemas associados a destacamentos. Assim, foi possível a identificação da presença de água em três zonas de interesse durante a exposição solar, tanto em períodos de análise de meia hora, como de uma hora, visto que os resultados são similares. Foi possível ainda eliminar o efeito de reflexões com esta análise multivariada.

A ACP também foi aplicada ao tratamento de imagens térmicas para a manutenção de componentes elétricos, permitindo avaliar o aquecimento excessivo de máquinas e outros equipamentos. Por isso, Santos [20] evidenciou a relação entre os padrões térmicos e as variações de temperatura nos termogramas resultantes do estudo de um conjunto de dados, obtidos pela simulação do aquecimento de uma chave elétrica. Assim, identificou a variabilidade espacial e temporal da informação. Do mesmo modo, procedeu ao aquecimento de um painel elétrico, composto por blocos de alumínio fixados numa placa de acrílico, onde foi possível através de uma análise no modo espacial e no modo temporal, compreender as relações entre as componentes principais e o perfil térmico do sistema. As componentes principais revelaram que espacialmente os termogramas sofreram alterações apenas na região aquecida, enquanto que no tempo, cada imagem difere da outra, apesar de apresentarem regiões iguais. Por isso, as componentes principais espaciais detetaram o local e geometria do defeito, e as componentes principais temporais mostraram quando ocorreu o aquecimento.



# 3

## METODOLOGIA

### 3.1. OBJETIVOS

Neste trabalho aplicou-se a análise de componentes principais aos dados resultantes de ensaios termográficos efetuados durante a embebição de provetes de betão leve. A água absorvida pelo provete origina uma diminuição da temperatura superficial, porque a evaporação é uma reação endotérmica, que vai evoluindo ao longo do ensaio. A embebição pela base e pelo topo dos provetes provoca padrões térmicos distintos. Procurou-se com a aplicação da ACP entender quais as regiões mais afetadas, assim como os pontos onde existe uma variação mais acentuada dos valores da temperatura. Procurou-se também estabelecer diferenças entre os dois tipos de embebição.

### 3.2. DESCRIÇÃO DO ENSAIO

Os dados analisados neste trabalho resultam de um estudo experimental já anteriormente desenvolvido. Ferreira [13], recorreu a ensaios laboratoriais, com o objetivo de avaliar a evolução de humidade em provetes de betão leve ( $0.28 \times 0.21 \times 0.075 \text{ m}^3$ ). A embebição parcial dos provetes ocorreu pelo topo e pela base.

Primeiramente, antes do início do ensaio, para garantir que os provetes se encontravam totalmente secos, estes foram colocados em estufa, durante 4 dias a  $70^\circ\text{C}$ . Posteriormente foram arrefecidos numa caixa estanque com sílica gel durante 24 horas, que foi colocada no interior de câmara climática a  $20^\circ\text{C}$ , com o intuito de evitar perturbações do exterior. Foi necessário um arrefecimento prévio dos provetes antes do início do ensaio para que fosse possível observar o efeito da humidade e não o do arrefecimento, isto é, para que padrões térmicos obtidos nos termogramas resultassem do arrefecimento da superfície por ação da humidade e não das trocas de calor entre o provete e a ambiência.

Para a humidificação pela base garantiu-se uma lâmina de água com 5mm acima da base do provete, durante 24 horas, com uma temperatura da câmara climática de  $20^\circ\text{C}$  e humidade relativa de 60%.

Na humidificação pelo topo recorreu-se a um silicone transparente, com o intuito de assegurar que uma lâmina de água de 5 mm ficava retida na face superior do provete durante 24 horas, sem fugas pelas faces laterais, nas mesmas condições da humidificação pela base.

A câmara termográfica foi colocada dentro da câmara climática, como se verifica na Figura 1, e programada para captar as imagens térmicas com uma periodicidade de 5 minutos durante as primeiras 8 horas de humidificação e de 10 minutos nas restantes 16 horas. O ensaio foi realizado com a luz da câmara climática apagada. Desta forma foi possível evitar perturbações nos termogramas causadas pela presença do operador. Considerou-se ainda uma emissividade de 0,91 para os provetes. Da humidificação pela base e pelo topo resultaram 193 termogramas, captados pela câmara termográfica, durante 24 horas.



Figura 1 - Provetes no interior da câmara climática

### 3.3. TRATAMENTO DE DADOS

As imagens em bruto necessitam de um pré-tratamento para possibilitar a aplicação da análise de componentes principais e os resultados obtidos após a aplicação do método também têm de ser tratados para poderem ser apresentados como mapa de cores ou imagens. Para tal, utilizaram-se *softwares* específicos como o *InfReC Analyzer*, o *Surfer*, o *Microsoft Excel®* e o *IBM SPSS Statistics 25*.

O *InfReC Analyzer* é um programa que possibilita a obtenção precisa da temperatura em qualquer ponto da imagem. Assim, com este *software* é possível visualizar cada uma das imagens térmicas e seleccionar uma caixa apenas com a área correspondente ao provete, permitindo excluir as zonas que ficam fora da região de interesse. O programa permite extrair para o *Microsoft Excel®* uma matriz de valores que corresponde às temperaturas de cada ponto da caixa definida.

Com o *Surfer*, através do fornecimento de dados em três dimensões, consegue-se representar mapas de contorno que traduzem os valores da temperatura da área de interesse, possibilitando a visualização dos

contrastes da temperatura devido à associação a um conjunto de cores. É possível ainda atribuir uma escala a esses mapas, com correspondência de cores, em função dos valores máximos e mínimos de temperatura atingidos. Este programa foi utilizado para representar como imagem os resultados da aplicação da ACP aos dados.

Na humidificação pela base verificou-se uma discrepância acentuada de temperatura entre os primeiros termogramas e os restantes, isto é, nas primeiras imagens térmicas captadas (T001, T002, T003) é possível visualizar uma diferença entre a temperatura superficial do provete e o interior da câmara climática, o que significa que no início do ensaio o provete possui uma temperatura superior à do meio ambiente. Como este facto não está relacionado com a presença de humidade, excluíram-se nesta análise esses termogramas e considerou-se o T004 como o termograma inicial, visto que a temperatura deste está mais próxima da da câmara climática.

Na humidificação pelo topo, pelos mesmos motivos, considere-se o termograma T007 como o termograma inicial, uma vez que os anteriores também apresentam uma temperatura muito elevada relativamente à ambiência.

Numa primeira fase, antes da aplicação da ACP, efetuou-se um tratamento e análise de dados através de algumas medidas estatísticas descritivas e representações gráficas. Esta análise permite observar a evolução das temperaturas durante os períodos de humidificação pela base e pelo topo, do provete. Como já referido, a humidificação ocorreu durante 24 horas e, por isso, divide-se o período de análise em três intervalos de tempo, as primeiras oito horas, as segundas e as terceiras, sendo assim possível avaliar diferenças entre as temperaturas registadas.

Na humidificação pela base, percebeu-se que a região da base possui temperaturas mais reduzidas e, por isso, é necessário caracterizar com mais detalhe essa área de interesse, daí que se optou por fazer incidir a análise não só na área total do provete, mas também, especificamente, na metade inferior do provete. Na humidificação pelo topo, a zona de cima é mais relevante para o estudo e, por esse motivo, a análise também foi efetuada à metade superior do provete.

A representação gráfica dos termogramas permite a análise de algumas das características das variáveis em estudo de forma simples e intuitiva, assim como a ilustração da dispersão dos dados. A representação dos intervalos de confiança e das caixas de extremos e quartis (*boxplots*), por cada intervalo de oito horas, evidenciam a variação da temperatura, possibilitando a caracterização da respetiva distribuição.

### **3.4. ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (ACP)**

Aos dados associados às imagens térmicas obtidas na sequência da humidificação dos provetes, aplica-se a análise de componentes principais, procurando evidenciar as regiões com maior contraste térmico,

e perceber a sua relação com a embebição de água pela base e pelo topo. As informações extraídas com este método são obtidas por um cálculo automático e com maior precisão do que é possível ser obtida através de métodos visuais.

O conjunto de temperaturas, em cada uma das imagens térmicas, pode ser disposto em forma de um vetor do tipo  $X = [X_1, X_2, X_3, \dots, X_p]^T$ , em que T significa a sua transposição. A cada imagem térmica corresponde um vetor  $X_i$ , constituído por  $p$  variáveis.

Portanto, os vetores são representados da seguinte forma:

$$X_1 = \begin{bmatrix} X_{11} \\ X_{21} \\ \vdots \\ X_{p1} \end{bmatrix} X_2 = \begin{bmatrix} X_{12} \\ X_{22} \\ \vdots \\ X_{p2} \end{bmatrix} \dots X_n = \begin{bmatrix} X_{1n} \\ X_{2n} \\ \vdots \\ X_{pn} \end{bmatrix}$$

Assim, na análise de componentes principais, o conjunto de informação referente a todas as imagens térmicas é armazenada numa matriz de dados  $[X]$ , em que os seus valores correspondem às temperaturas. As imagens térmicas contêm informação espacial e temporal e os vetores acima descritos podem ser dispostos segundo linhas ou colunas, dependendo do tipo de abordagem. Portanto, neste conjunto de vetores, cada imagem corresponde a um vetor.

As imagens captadas são representadas por pixéis, em que  $n_x$  corresponde a cada um dos seus pixéis na largura da imagem, e  $n_y$  na altura e, por isso, cada pixel corresponde a uma coordenada no vetor, denominado por vetor imagem, com  $n$  pixéis. A construção destes vetores é baseada numa leitura das temperaturas por coluna das imagens térmicas e organizada numa matriz, em que cada vetor compreende a informação apenas referente a cada termograma.

A matriz  $[X]$  organiza todo o conjunto de dados captados, sendo constituída por um determinado número de imagens térmicas com informações, tanto espaciais como temporais. Assim, de acordo com a organização da matriz, pode desenvolver-se a análise no modo espacial e no modo temporal.

Na abordagem espacial, a matriz  $[X]$  tem  $N$  linhas, correspondendo cada linha a um vetor imagem, em que os seus componentes são temperaturas, e cada coluna está associada a um perfil térmico. Neste caso, a dimensão dos dados é  $n_y \cdot n_x$  e o número de medições é  $N$ , isto é, o número de imagens térmicas. O modo espacial tem a capacidade de identificar o defeito geométrico, ou seja, a geometria da macha de humidade, assim como a sua localização, acompanhando as variações espaciais, térmicas, ocorridas entre cada medição, com o intuito de eliminar a correlação espacial entre as variáveis. Assim, os vetores da matriz podem ser descritos da seguinte forma:

$$E_1 = \begin{bmatrix} E_{11} \\ E_{21} \\ \vdots \\ E_{p1} \end{bmatrix} E_2 = \begin{bmatrix} E_{12} \\ E_{22} \\ \vdots \\ E_{p2} \end{bmatrix} \cdots E_n = \begin{bmatrix} E_{1n} \\ E_{2n} \\ \vdots \\ E_{pn} \end{bmatrix}$$

Por isso, na abordagem espacial, a matriz de dados  $[X]$ , é constituída pelos vetores acima referidos, mas transpostos, isto é,  $E = [E_1, E_2, E_3, \dots, E_p]^T$ , em que cada linha é composta por cada um destes vetores, em que as  $p$  variáveis estão associadas às temperaturas em cada posição.

A abordagem temporal considera que os termogramas constituem as colunas da matriz  $[X]$ , sendo que esta tem  $p$  colunas e  $n$  linhas, em que cada uma representa um perfil temporal. Deste modo, a dimensão dos dados é  $p$ , o número de imagens térmicas, e o número de medições é  $n$  ( $n_y \cdot n_x$ ). Esta abordagem evidencia a evolução da humidade ao longo do tempo e, por isso, cada termograma está relacionado com um instante de observação. Os vetores são dispostos na matriz de acordo com a representação seguinte, em que as suas  $p$  variáveis representam as suas temperaturas por instante:

$$T_1 = \begin{bmatrix} T_{11} \\ T_{21} \\ \vdots \\ T_{p1} \end{bmatrix} T_2 = \begin{bmatrix} T_{12} \\ T_{22} \\ \vdots \\ T_{p2} \end{bmatrix} \cdots T_n = \begin{bmatrix} T_{1n} \\ T_{2n} \\ \vdots \\ T_{pn} \end{bmatrix}$$

Os resultados obtidos pela análise de componentes principais não são influenciados pela disposição do conjunto de dados, uma vez que no modo temporal  $[X]$  e no modo espacial  $[X]^T$ , a diferença reside na subtração de um vetor de referência a cada uma das matrizes. Para a obtenção das componentes principais deve-se subtrair esse vetor a todas as colunas ou linhas da matriz, sendo comum ser uma imagem média ou um perfil temporal médio.

A obtenção das componentes principais requer o cálculo dos valores e vetores próprios e da respetiva matriz de covariâncias. A matriz de covariância é simétrica, daí que é sempre possível encontrar um conjunto de vetores próprios ortonormais e os correspondentes valores próprios. O vetor próprio associado ao maior valor próprio, corresponde à primeira componente principal extraída do conjunto de dados.

Por uma questão de simplificação e com o intuito de promover uma interpretação mais intuitiva, decidiu-se denominar as imagens de referência relativas à posição como o perfil posição, e as imagens de referência relativas ao tempo como o perfil instante.

Considera-se ainda importante, não só fazer a subtração relativamente a instantes e posições médias, mas também a outros instantes e posições relevantes na análise. Quanto aos instantes, para além do instante médio de toda a sequência de imagens térmicas, pretende-se verificar se os instantes inicial e

final conseguem explicar bem o fenómeno da humidificação. A análise aplica-se inicialmente a todo o período do ensaio e seguidamente apenas às primeiras 8 horas de inspeção, às segundas e últimas oito horas, para avaliar o fenómeno com mais detalhe. Quanto à posição de referência, para além da posição média, também se inclui no estudo uma posição na base e outra no topo. Devido à quantidade de tratamentos possíveis para as imagens neste estudo, achou-se pertinente a atribuição de códigos (Figura 2 e Figura 3), de forma a promover uma interpretação intuitiva.

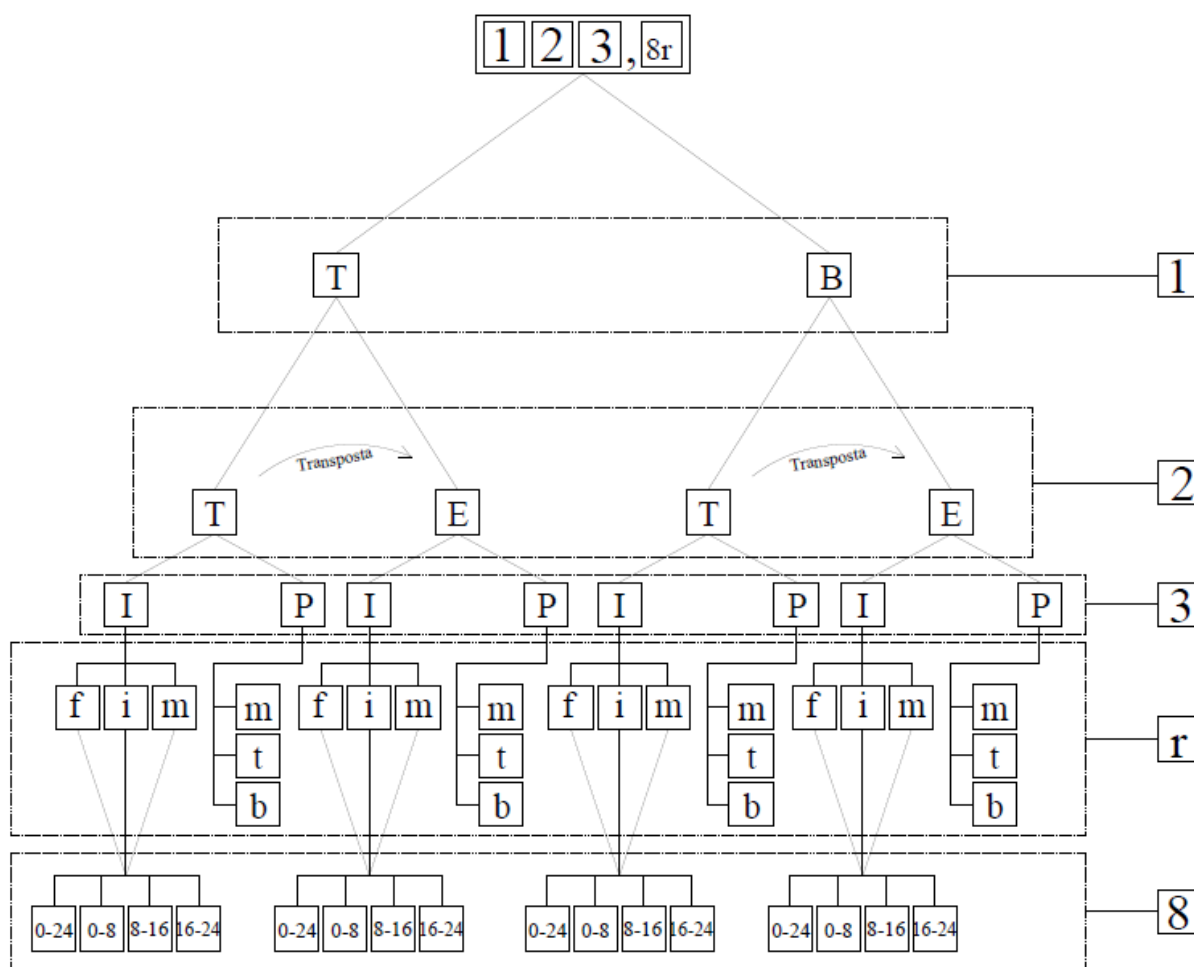


Figura 2 – Esquema para identificar as referências



1	Tipo de Humidificação :	2	Tipo de Abordagem :	3	Tipo de Perfil :
T	Humidificação pelo Topo	T	Temporal	I	Perfil Instante
T	Humidificação pela Base	E	Espacial	P	Perfil Posição
r	Perfil de referência :				
m	Instante médio	m	Posição média		
i	Instante inicial	t	Posição do topo		
f	Instante final	b	Posição da base		
8	Período de análise :				
0-8	Intervalo das primeiras 8 horas				
8-16	Intervalo das segundas 8 horas				
16-24	Intervalo das terceiras 8 horas				
0-24	Período total - Dia inteiro				

Figura 3 - Legenda dos códigos das referências

Na utilização do software *IBM SPSS Statistics 25*, a redução da dimensão dos dados, que permite efetuar a análise de componentes principais, baseia-se numa análise fatorial, ou seja, é analisada a correspondência entre a variável observada e um fator específico.

A obtenção de componentes principais depende da quantidade de informação que é possível desprezar e, por isso, é necessário averiguar a quantidade de componentes principais que conseguem descrever a maior parte da variabilidade dos dados. Assim, a partir da análise da representação gráfica dos valores próprios da matriz de covariâncias, em função de cada uma das componentes principais (*Scree plot*) na Figura 4, é possível identificar o número de componentes relevantes, selecionando todas as componentes até que a linha apresente um declive reduzido. O *software*, por defeito, retém as componentes principais com valor próprio superior a 1 e, por isso, se o valor próprio for inferior a 1, essa componente não é considerada relevante.

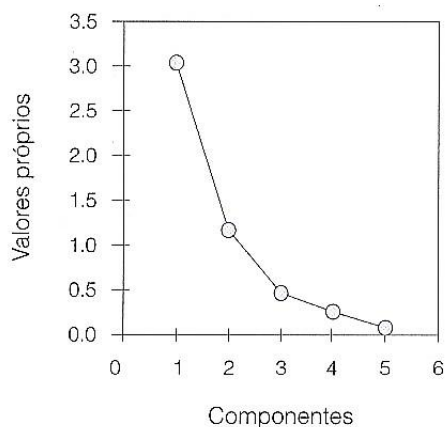


Figura 4 – Scree plot [21]

A variância explicada por cada uma das componentes principais é calculada, bem como a sua percentagem de afetação a cada uma das variáveis originais, permitindo excluir as componentes com informação irrelevante, isto é, aquelas que explicam uma parte reduzida da variabilidade dos dados.

A análise de componentes principais integra uma rotação de fatores em que o objetivo é produzir uma solução interpretável. Grande parte dos métodos de rotação pretende que os pesos fatoriais de um conjunto reduzido de variáveis seja o maior possível num fator, e o menor possível nos outros fatores ortogonais, por isso optou-se pela rotação *varimax*, em que apenas uma das variáveis originais está fortemente relacionada com um único fator e pouco relacionada com os restantes fatores [21].

Na análise dos *scores*, coeficientes das componentes principais, é possível diferenciar as regiões num termograma. Assim, a região de interesse numa imagem térmica é representada com uma maior dispersão dos dados, associada ao facto de existir grande variabilidade térmica. A obtenção dos *scores* e a sua representação gráfica permitem identificar quais os termogramas que se afastam da tendência dos restantes [20].

Os coeficientes dos vetores próprios, designados *loadings*, permitem relacionar cada termograma (variável original) com as componentes principais obtidas. A representação dos *loadings* permite verificar quais as variáveis determinantes para cada uma das componentes principais, isto é, ajuda a perceber quais os termogramas com maior significado em cada componente principal, e o seu valor encontra-se num intervalo entre -1 e 1. Os termogramas são associados a vetores, em que a sua direção está relacionada com a variabilidade e o comprimento é referente à contribuição de cada termograma [20].

# 4

## ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS TERMOGRAMAS

### 4.1. HUMIDIFICAÇÃO PELA BASE

Numa análise descritiva dos termogramas, realizada através da representação gráfica das temperaturas em caixas de extremos e quartis (*boxplots*), observa-se a distribuição dos dados, possibilitando a identificação do centro da amostra através da mediana e a dispersão através da distância entre os quartis associados a cada termograma. Assim, com esta análise estatística simples, é possível identificar características relevantes das imagens térmicas relativas ao conjunto de temperaturas da totalidade do provete.

A Figura 5, representativa das primeiras oito horas de ensaio, ilustra a variação das temperaturas dentro de cada um dos termogramas. É evidente a diminuição gradual da temperatura ao longo do ensaio, desde o início, mas com tendência a estabilizar ao final das primeiras 4 horas, justificada pelo facto de o provete já ter absorvido maior parte da lâmina de água e, por esse motivo, as temperaturas tornaram-se mais reduzidas. Pela Figura 5 pode constatar-se a assimetria presente nas temperaturas em cada termograma, dado que os bigodes inferiores dos *boxplots* são maiores do que os bigodes superiores, isto é, as temperaturas mínimas encontram-se mais afastadas da mediana do que as temperaturas máximas. A quantidade de valores extremos (*outliers*) deve-se à presença de temperaturas muito discrepantes em relação à tendência central. Esses valores relacionam-se com o contraste entre a saturação da base do provete, provocada pela água, e o seu topo pouco humidificado.

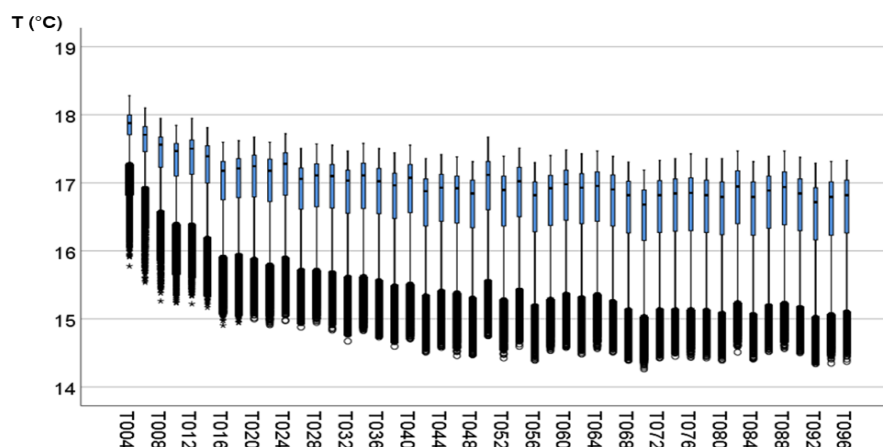


Figura 5 - Boxplots dos termogramas relativos às primeiras 8 horas de ensaio

Verifica-se que o termograma T050 apresenta um aumento de temperatura em relação aos seus termogramas adjacentes, evidenciada pelo aumento da sua mediana, coincidente com o final das primeiras 4 horas de ensaio. Pela análise da imagem térmica correspondente, constata-se uma diminuição da mancha húmida, como ilustra a Figura 6, justificada por uma eventual entrada na câmara climática.

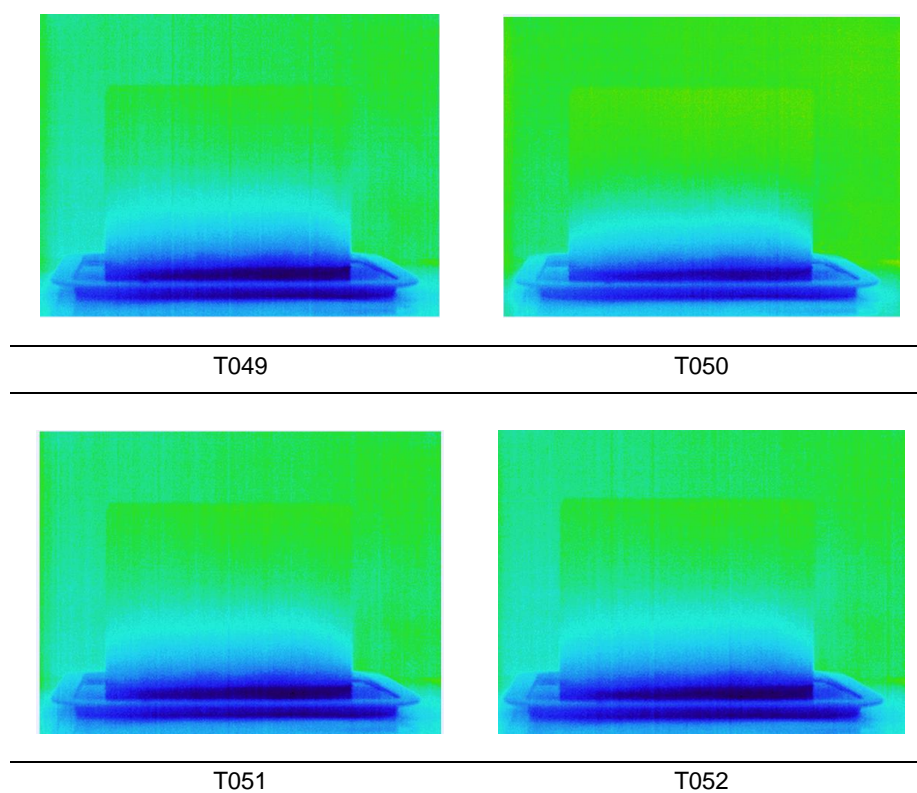


Figura 6 – Evolução da mancha húmida no final das primeiras 4 horas de ensaio

A Figura 7 evidencia a variação das temperaturas registadas nas segundas 8 horas de ensaio, podendo constatar-se que a mediana das temperaturas é aproximadamente constante, devido ao facto de não existirem alterações significativas de temperaturas ao longo deste período. No entanto, ainda se registam alguns *outliers*, associados à existência de valores extremos de temperatura, relacionados com o facto de a base do provete estar totalmente húmida, ao contrário do topo do provete, que se encontra mais seco, daí que o bigode inferior nos *boxplots* ainda seja grande, comparativamente com o superior.

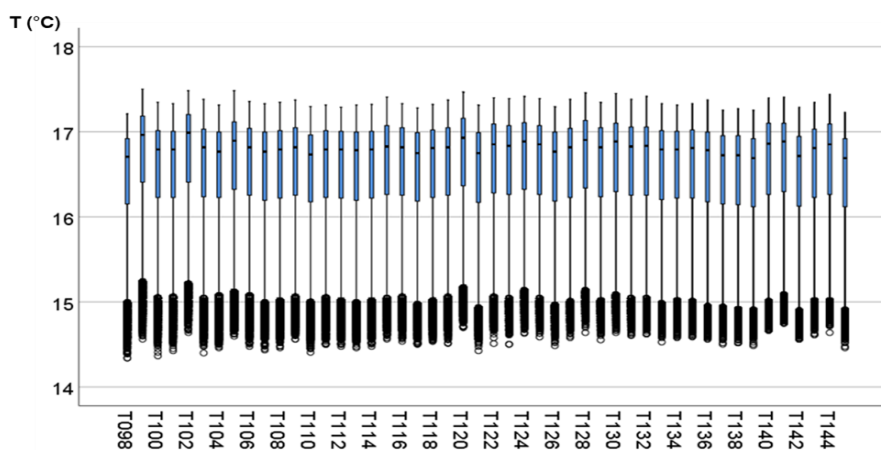


Figura 7 - *Boxplots* dos termogramas relativos às segundas 8 horas de ensaio

A Figura 8, ilustrativa das terceiras 8 horas de ensaio, também apresenta um conjunto de termogramas com distribuição de temperaturas muito semelhantes ao longo do tempo, pelo facto de a humidificação do provete ser cada vez mais lenta e não provocar variações significativas, o que está relacionado com a sua capacidade de absorção de água, apresentando valores de medianas idênticos. Neste caso, a quantidade de *outliers* é mais reduzida do que no período de ensaio anterior, visto que as discrepâncias entre as temperaturas de cada termograma são mais reduzidas nesta fase, porque o provete já absorveu uma grande quantidade de água. A assimetria dos dados continua a ser notória através do comprimento do bigode inferior em relação ao superior. É possível também observar que tendencialmente a temperatura diminui; e, por isso, o último termograma deveria registar as menores temperaturas do ensaio; no entanto isso não se verifica, podendo estar associado ao facto de existir uma menor lâmina de água disponível para o provete absorver.

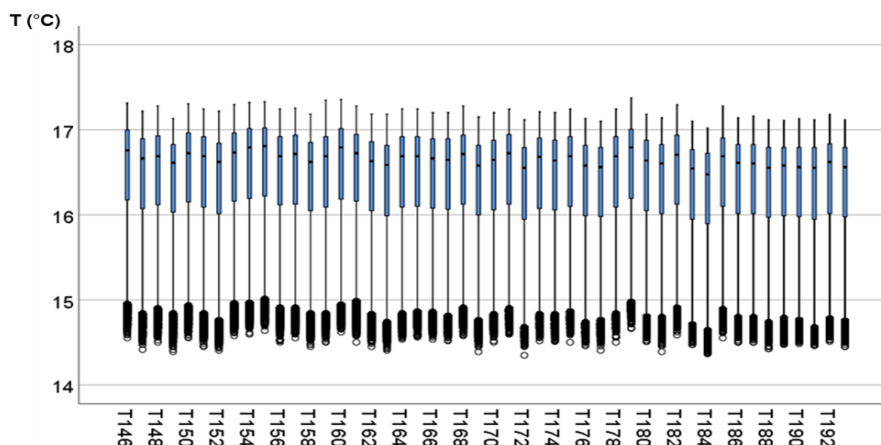


Figura 8 *Boxplots* dos termogramas relativos às terceiras 8 horas de ensaio

A representação gráfica dos coeficientes de assimetria realça os termogramas em que o conjunto de temperaturas é mais assimétrico, permitindo reconhecer os períodos em que o crescimento da mancha húmida foi mais acentuado. A Figura 9 caracteriza a assimetria à esquerda (coeficientes negativos) das temperaturas ao longo do ensaio, característicos dos valores extremos inferiores em cada termograma, isto é, das temperaturas mais baixas. A assimetria é mais evidente nos primeiros termogramas, uma vez que o provete fica sujeito a um maior desequilíbrio de temperatura devido à humidificação da base. Ao longo do ensaio, o coeficiente de assimetria segue uma tendência para uma linha horizontal, isto é, a assimetria diminui e tende a estabilizar, visto que o provete fica sujeito a uma redução de temperatura constante devido ao efeito da água.

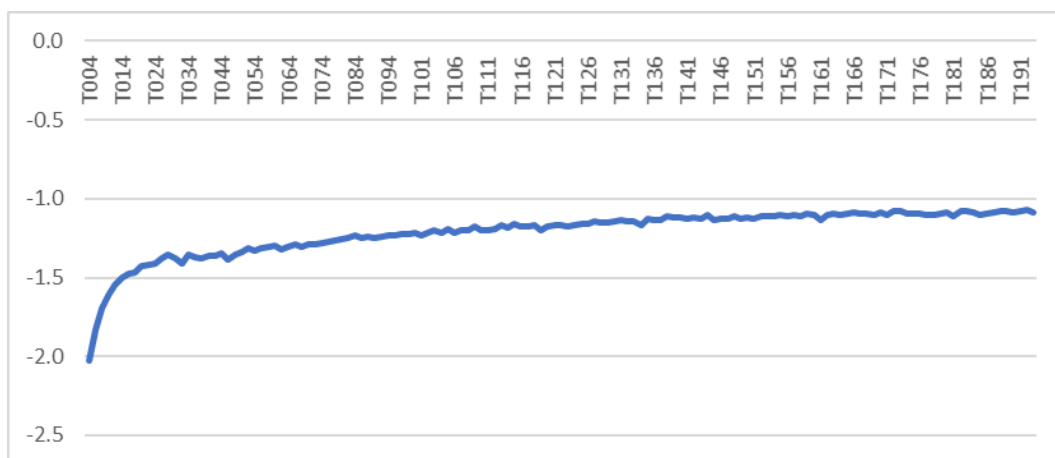


Figura 9 - Representação da evolução ao longo do dia dos coeficientes de assimetria das temperaturas durante todo o ensaio

Como a base do provete possui temperaturas mais extremas (baixas), uma análise centrada apenas na metade inferior do provete tem a capacidade de ajudar a compreender as variações ocorridas; a análise seguinte apenas inclui os dados das temperaturas em metade do provete (metade inferior).

A ampliação da análise às temperaturas registadas, apenas na base do provete, salienta a diminuição de temperatura ao longo do ensaio. Assim, na Figura 10, é possível também verificar a existência de assimetria pelo comprimento de cada bigode. A presença de *outliers* nas primeiras 8 horas de ensaio está relacionada com a existência de temperaturas muito divergentes das restantes, isto é, como a base do provete no início do ensaio se encontra mais seca e a presença de água provoca uma diminuição acentuada das temperaturas nos pontos em contacto com a água, registam-se algumas temperaturas com ordem de grandeza diferente das restantes.

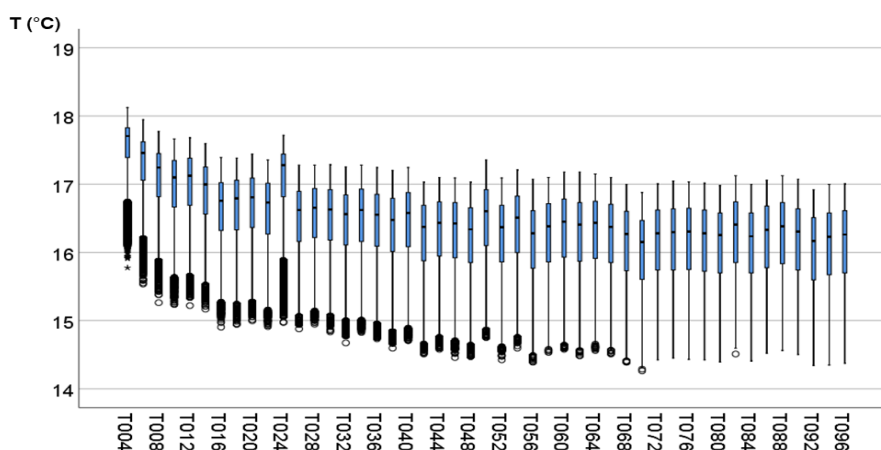


Figura 10 - Boxplots dos termogramas relativos às primeiras 8 horas de ensaio na metade inferior do provete

O T024 revela temperaturas mais elevadas, comparativamente aos restantes, devido ao facto de a câmara térmica ter sido aberta e ter ocorrido alguma perturbação na imagem térmica. Por esse motivo, decidiu-se eliminar este termograma da análise de componentes principais.

As medianas das temperaturas nas segundas oito horas de ensaio (Figura 11) mantêm-se aproximadamente semelhantes ao longo do tempo. Nesta fase, a diminuição da temperatura não é perceptível, uma vez que o seu decréscimo é muito lento; a base já se encontra totalmente húmida e a temperatura dentro da câmara climática varia muito pouco ao longo do ensaio. A inexistência de *outliers* indica uma elevada homogeneidade entre as temperaturas registadas, devido ao facto de esta metade do provete se encontrar praticamente com as mesmas temperaturas.

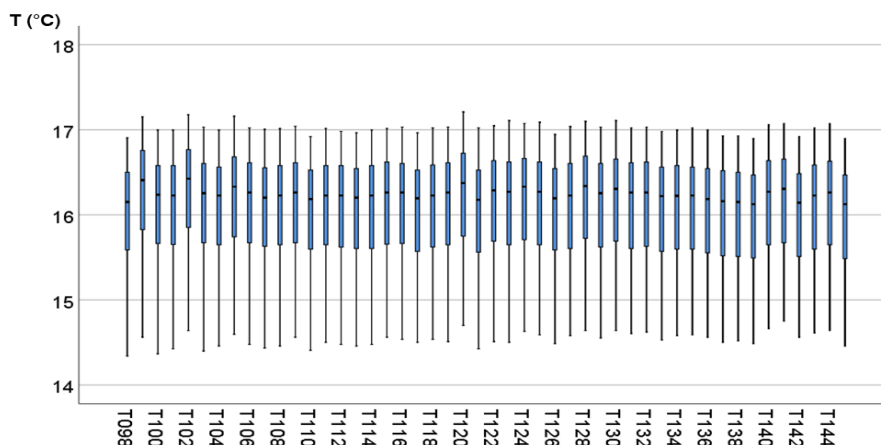


Figura 11 – *Boxplots* dos termogramas relativos às segundas 8 horas de ensaio na metade inferior do provete

Nas últimas horas de ensaio, Figura 12, as temperaturas medianas também têm variações pouco significativas, pelos mesmos motivos do período de ensaio anterior. A assimetria da distribuição de temperaturas é pouco acentuada, devido ao facto de a base do provete estar totalmente em contacto com a água. Não se verifica a presença de *outliers*, pelas mesmas razões descritas para os termogramas do período anterior.

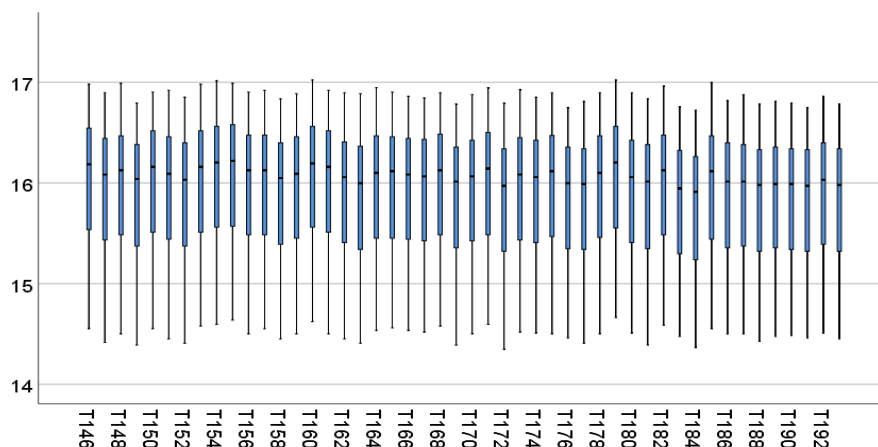


Figura 12 - *Boxplots* dos termogramas relativos às terceiras 8 horas de ensaio na metade inferior do provete

A assimetria do conjunto de temperaturas de meio provete é superior no início e tem tendência a ficar constante ao longo do ensaio, como está representado na Figura 13. O maior valor do coeficiente de assimetria em absoluto está associado ao termograma inicial, pois existe uma maior assimetria nesse



instante. Uma súbita descida do coeficiente de assimetria está associada ao T024, pois esse termograma apresenta um aumento de temperatura em relação aos restantes.

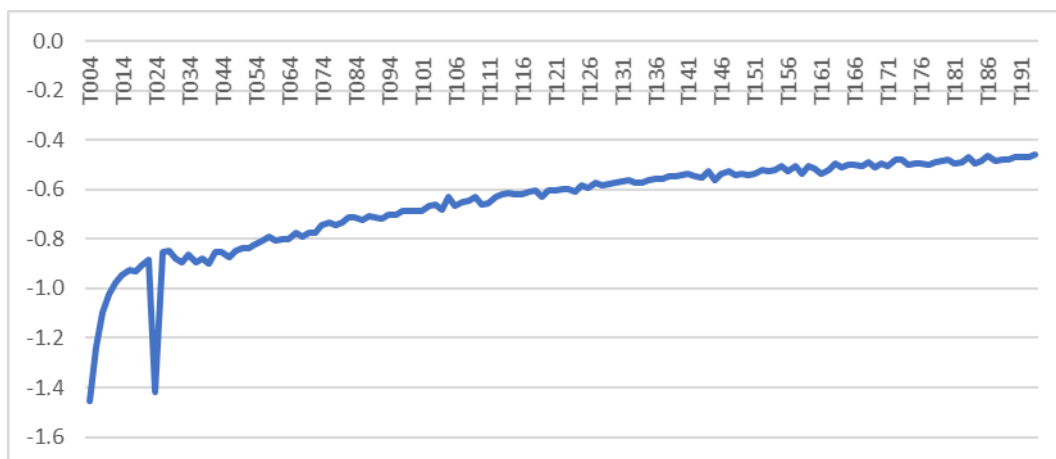


Figura 13 - Representação da evolução dos coeficientes de assimetria durante todo o ensaio na metade inferior do provete

A representação das temperaturas médias e respetivos intervalos de confiança, foram efetuadas inicialmente em intervalos de 4 horas e posteriormente de 8 em 8 horas, até perfazer as 24 horas, devido ao facto de se registarem temperaturas bastante mais elevadas nos primeiros termogramas comparativamente aos restantes. Como se verificaram variações acentuadas de temperatura nas primeiras 8 horas de ensaio e o desvio padrão é reduzido, os intervalos de confiança não eram perceptíveis nas ilustrações gráficas, porque apenas se identificava visualmente a sua média. De forma a que representação apresentasse a informação pretendida, a escala dos gráficos não é a mesma.

Da Figura 14 sobressai o decréscimo do valor médio da temperatura de cada termograma. A maior variação de temperatura entre os termogramas ocorre neste intervalo de tempo, onde se regista a temperatura média mais elevada. É ainda perceptível que a amplitude dos intervalos de confiança é aproximadamente constante entre cada termograma e que a sua variação é reduzida, sendo que o seu valor é inferior a 0,0143 °C neste ensaio.

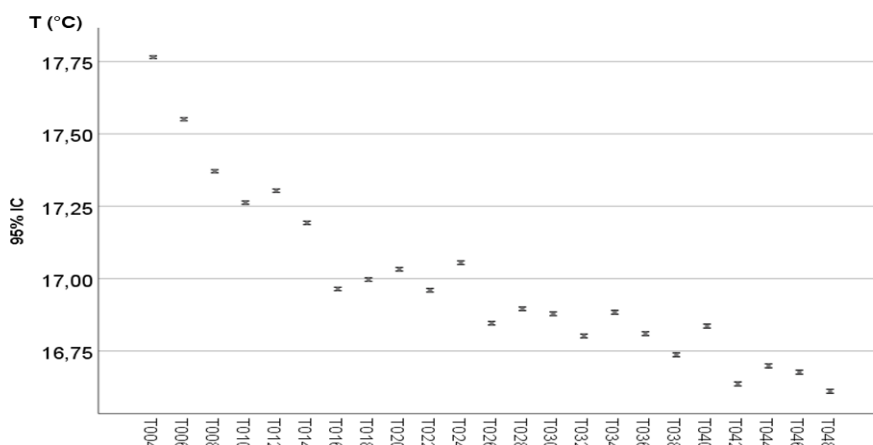


Figura 14 - Intervalos de confiança a 95% da temperatura média dos termogramas nas primeiras 4 horas de ensaio

As amplitudes dos intervalos de confiança das temperaturas médias nas 4 horas seguintes de ensaio (Figura 15), também não apresentam uma variação significativa e o respetivo valor em cada termograma é inferior a 0,0153 °C. No entanto, devido à diferente escala do anterior, a apresentação gráfica parece indicar o contrário. A média das temperaturas também apresenta variação reduzida entre cada termograma, pois neste intervalo os efeitos da humedificação não são tão enfatizados.

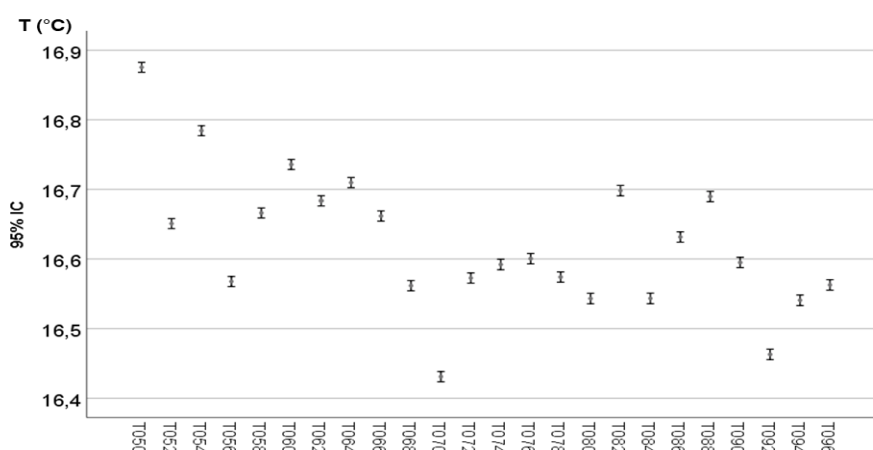


Figura 15 - Intervalos de confiança a 95% da temperatura média dos termogramas nas segundas 4 horas de ensaio

A Figura 16, representativa das segundas 8 horas de ensaio, permite observar que a temperatura média entre termogramas não revela uma variação significativa, visto que neste período, o provete já se encontra com a base totalmente húmida e a diminuição da temperatura é um processo lento. A amplitude dos intervalos de confiança não excede 0,0153 °C.

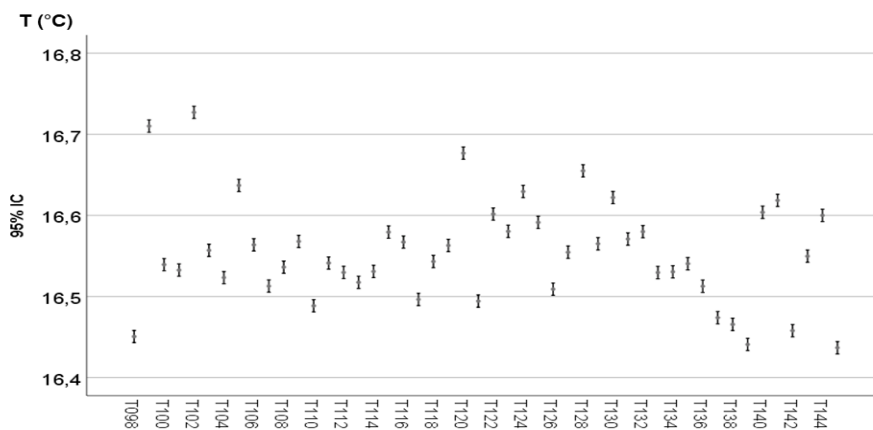


Figura 16 - Intervalos de confiança a 95% da temperatura média dos termogramas nas segundas 8 horas de ensaio

Pelos motivos já citados anteriormente, as temperaturas médias são pouco dispersas (Figura 17), uma vez que não existe uma diminuição drástica das temperaturas nesta fase, pois este período é representativo das últimas horas de ensaio. A amplitude dos intervalos de confiança, associados a cada termograma, não excede 0,0154 °C.

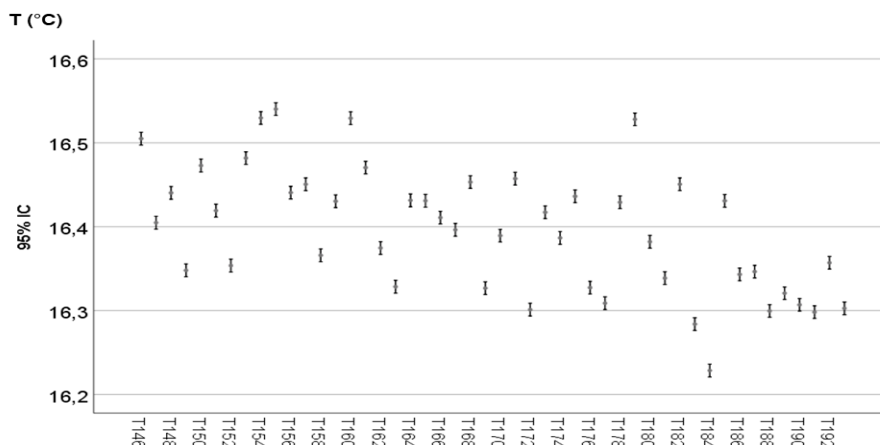


Figura 17 – Intervalos de confiança a 95% da temperatura média dos termogramas nas terceiras 8 horas de ensaio

Como analisado anteriormente através de *boxplots*, as temperaturas da base (metade inferior) do provete também requerem uma análise mais detalhada em relação ao seu intervalo de confiança, daí que a análise seguinte corresponda aos valores obtidos apenas na zona onde a humedificação se desenvolveu mais, isto é, a metade inferior do provete.

A amplitude dos intervalos de confiança para as temperaturas médias não excede 0,0194 °C no conjunto dos termogramas representados na Figura 18, representativa das primeiras 4 horas. Como era esperado, a temperatura diminui ao longo do ensaio. Este facto é comprovado pela redução da temperatura média de cada termograma, embora as amplitudes dos intervalos de confiança sejam pequenas. O T024 revela uma temperatura média superior comparativamente aos restantes, como já referido.

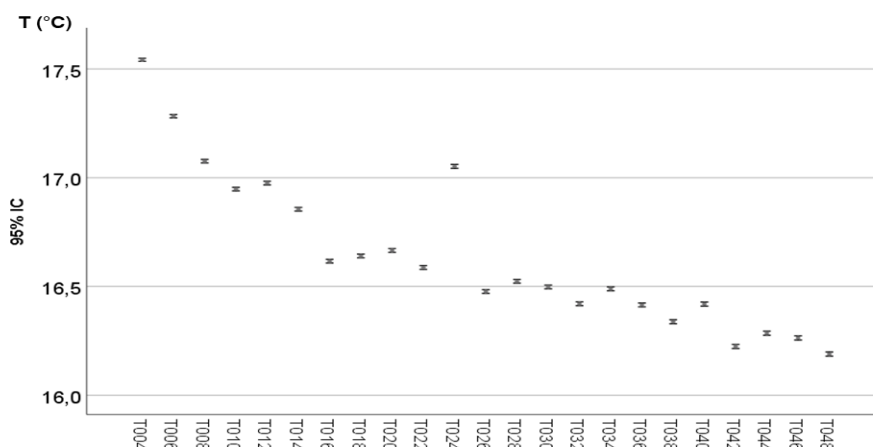


Figura 18 – Intervalos de confiança a 95% da temperatura média dos termogramas nas primeiras 4 horas de ensaio na metade inferior do provete

Na Figura 19, observa-se que as temperatura médias nos termogramas têm uma tendência mais constante, isto é, a sua oscilação é cada vez menor ao longo do ensaio, visto que neste período os efeitos da humidificação não são tão pronunciados: a diminuição de temperatura expressa-se a um ritmo cada vez menor e os respetivos intervalos de confiança para as médias não excedem 0,0203 °C.

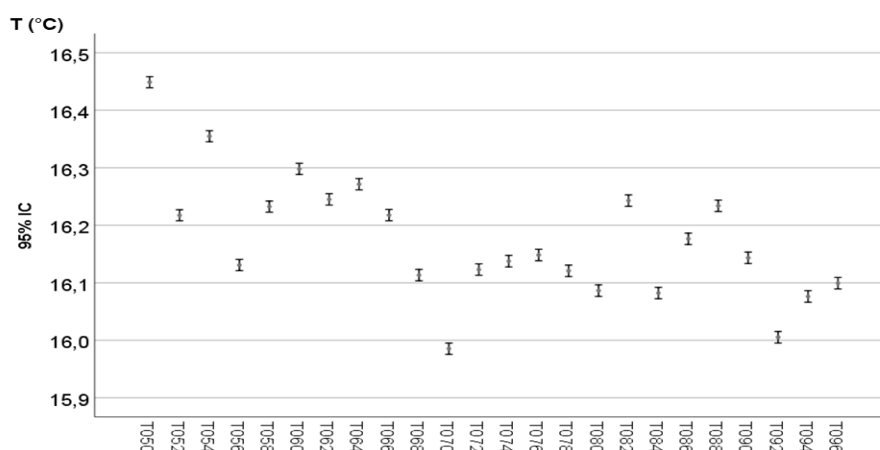


Figura 19 - Intervalos de confiança a 95% da temperatura média dos termogramas nas segundas 4 horas de ensaio na metade inferior do provete

As médias das temperaturas nas segundas 8 horas (Figura 20) possuem ainda menos variação do que as 4 horas anteriores, uma vez que a diminuição de temperatura é cada vez menos pronunciada, como seria expectável. A amplitude dos intervalos de confiança para as temperaturas médias não excede 0,0202 °C.

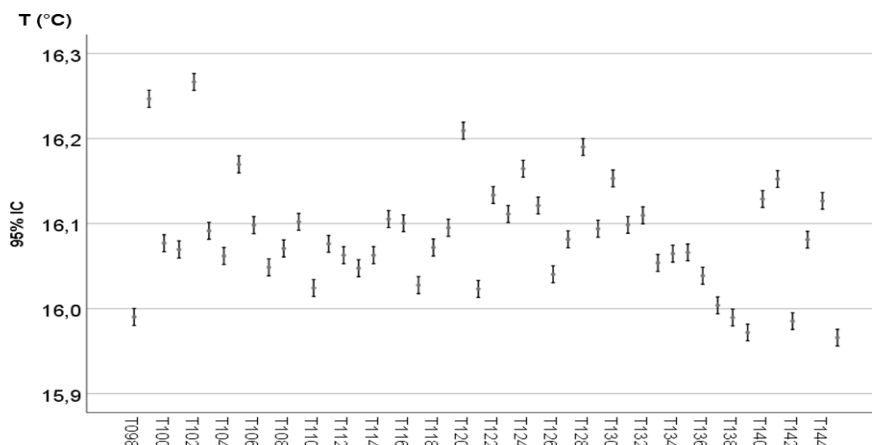


Figura 20 - Intervalos de confiança a 95% da temperatura média dos termogramas nas segundas 8 horas de ensaio na metade inferior do provete

A oscilação da temperatura (Figura 21) é pequena, pois em metade do provete as temperaturas começam a apresentar homogeneidade e, por isso, a dispersão dos seus valores é reduzida. Os intervalos de confiança para as médias são inferiores ao anterior e não excedem 0,0201 °C.

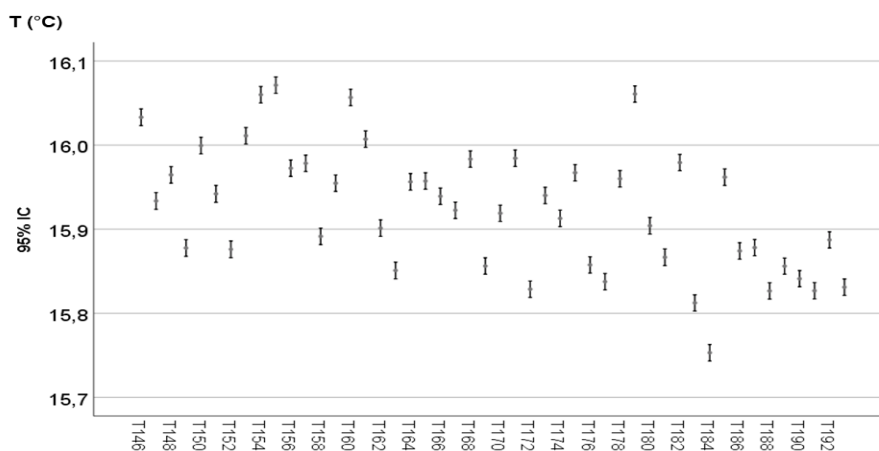


Figura 21 - Intervalos de confiança a 95% da temperatura média dos termogramas nas terceiras 8 horas de ensaio na metade inferior do provete

## 4.2. HUMIDIFICAÇÃO PELO TOPO

Na humedificação pelo topo, a análise é semelhante à da base, recorrendo ao mesmo método para explicar as características das imagens térmicas. Os gráficos (Figura 22 a Figura 24) representam o conjunto de temperaturas associadas à totalidade do provete.

A Figura 22, descritiva da humidificação pelo topo, evidencia o decréscimo da temperatura nas primeiras oito horas de ensaio, mais acentuado nas primeiras 4 horas; no entanto, pode constatar-se que o bigode inferior nos *boxplots* não tem um comprimento muito superior ao bigode superior e, por isso, o intervalo de valores entre a mediana e a temperatura mínima é semelhante ao intervalo entre a mediana e a temperatura máxima e, portanto, a assimetria não é tão pronunciada. A existência de *outliers* relaciona-se com o facto de o topo do provete estar a absorver água e a sua base estar seca; daí que, em cada termograma, se registem valores extremos de temperaturas.

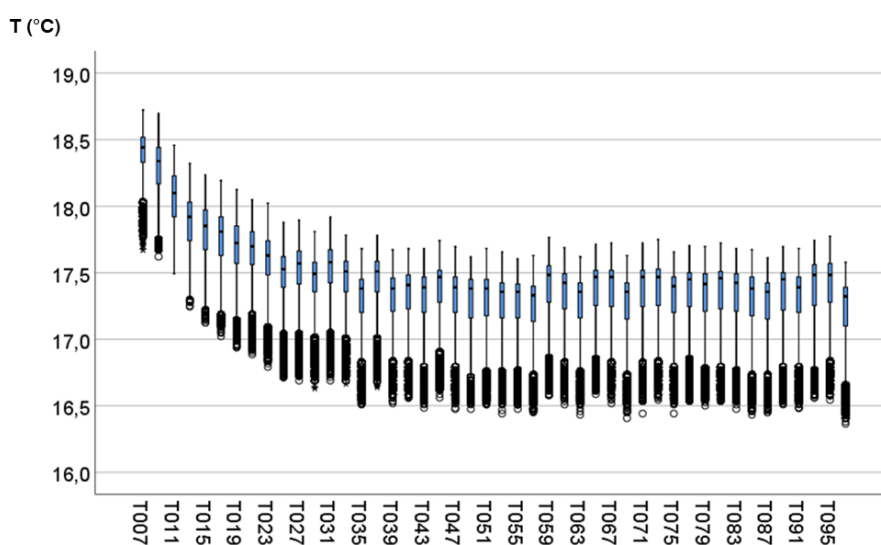


Figura 22 - *Boxplots* dos termogramas relativos às primeiras 8 horas de ensaio

A temperatura das segundas oito horas é aproximadamente constante, uma vez que as temperaturas medianas não apresentam variações significativas, como se verifica na Figura 23. No entanto, comparativamente à humidificação pela base, esta representação gráfica oferece a ilusão de uma oscilação das temperaturas medianas mais pronunciada devido ao facto de a escala não ser a mesma nas duas ilustrações, representativas do mesmo intervalo de tempo.

Os termogramas T104 e T105 evidenciam uma subida de temperatura, associada ao facto já exposto, de o operador ter entrado dentro da câmara climática e ter perturbado o ensaio com a sua presença, para garantir que a lâmina de água se encontrava sempre 5mm acima da face do provete.

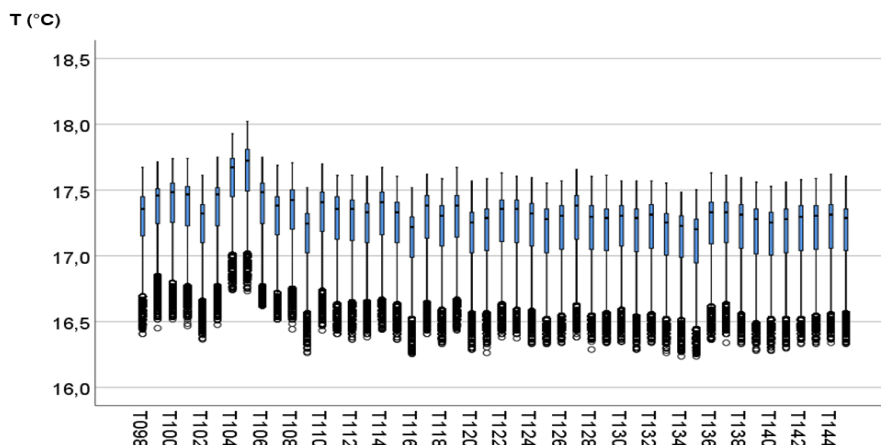


Figura 23 - *Boxplots* dos termogramas relativos às segundas 8 horas de ensaio

As últimas 8 horas de ensaio (Figura 24) também evidenciam uma temperatura mediana aproximadamente constante entre o conjunto de termogramas, dado que a água do topo do provete já atingiu a maior parte dos seus pontos e, por isso, não existe uma redução elevada da temperatura. A assimetria de temperaturas também é ilustrada pelo comprimento do bigode inferior dos *boxplots*, comparando com o bigode superior, visto que o provete tem a base mais seca do que o topo, originando contrastes entre os valores das temperaturas. A quantidade de *outliers* é menor do que no período anterior, pois a existência de valores extremos é menor, uma vez que existe uma maior homogeneidade de temperaturas, devido à humedificação pelo topo não ser tão eficiente como pela base.

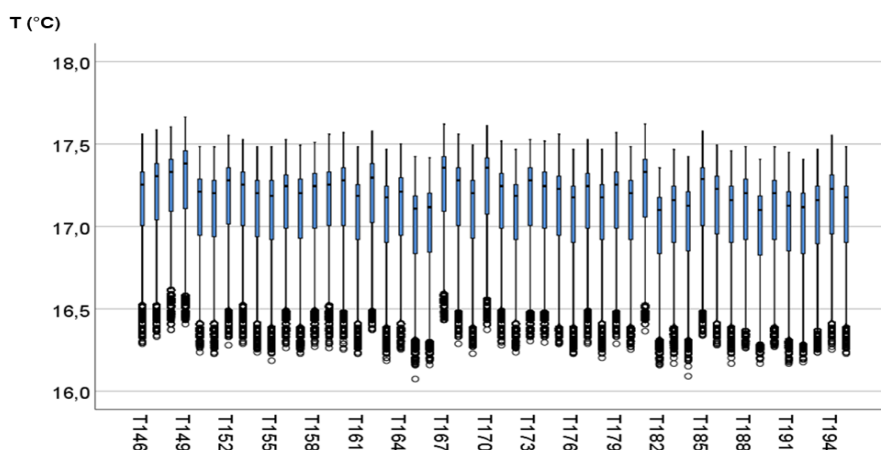


Figura 24 – *Boxplots* dos termogramas relativos às terceiras 8 horas de ensaio



A Figura 25, comprova que no início existe uma variação da assimetria das temperaturas, com tendência para estabilizar ao longo do ensaio. O facto de os coeficientes serem negativos, indica que do lado esquerdo, de uma distribuição normal, a assimetria é maior.

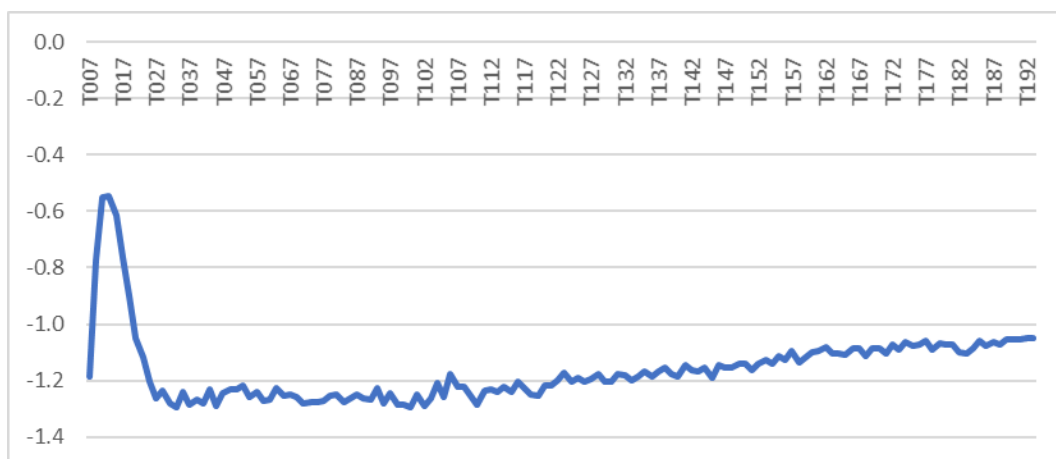


Figura 25 - Representação da evolução ao longo do dia dos coeficientes de assimetria das temperaturas durante todo o ensaio

Assim como na humidificação pela base, a análise das temperaturas incidiu na metade do provete, os gráficos seguintes (Figura 26 a Figura 28) também evidenciam apenas as características no topo do provete.

As temperaturas das primeiras 8 horas de ensaio, como era esperado, apresentam uma diminuição e, por isso, a assimetria é mais visível neste intervalo, devido à presença de água no topo do provete desde o início do ensaio. A existência de *outliers* só se verifica nos primeiros termogramas da Figura 26, porque apenas no início se registam temperaturas extremas, visto que a tendência é uma diminuição rápida das temperaturas nos pontos do topo do provete.

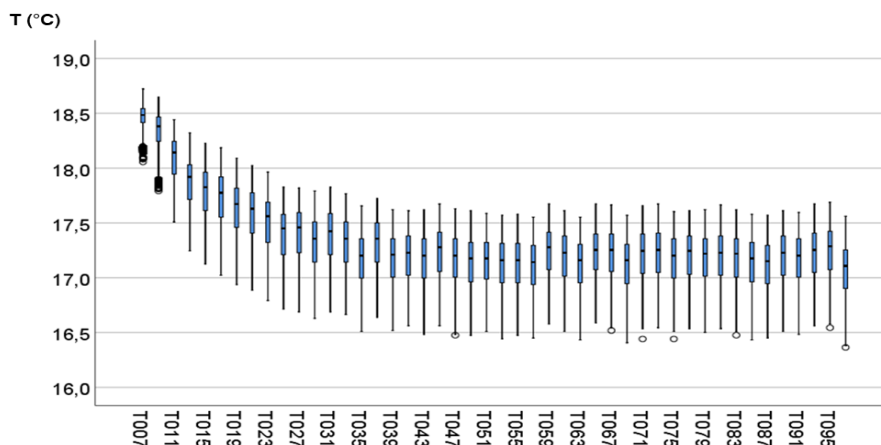


Figura 26 - *Boxplots* dos termogramas relativos às primeiras 8 horas de ensaio na metade superior do provete

Na Figura 27, que caracteriza as segundas oito horas, as temperaturas medianas são aproximadamente constantes no conjunto de termogramas representado, pois a variação de termograma para termograma não é significativa. A assimetria neste intervalo de tempo é menor do que no período de ensaio anterior, porque o comprimento do bigode superior nos *boxplots* é semelhante ao bigode inferior. Como já constatado, a subida de temperatura dos termogramas T104 e T105, em evidencia nesta figura, está associada à abertura da câmara.

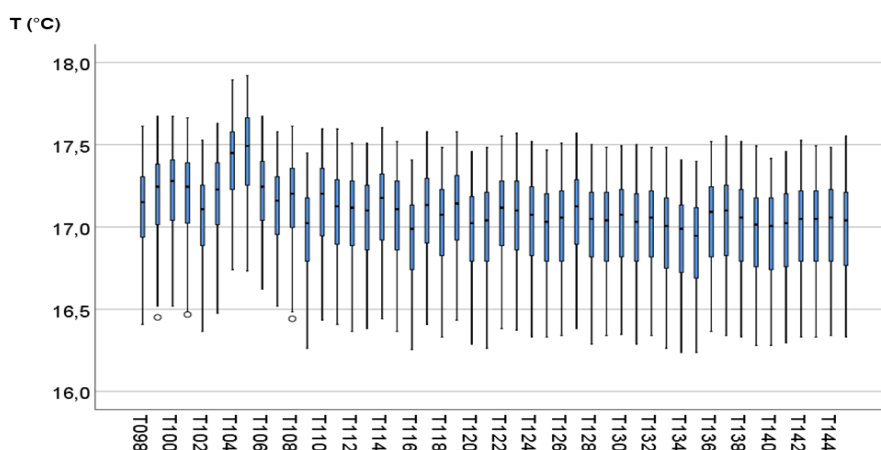


Figura 27 - *Boxplots* dos termogramas relativos às segundas 8 horas de ensaio na metade superior do provete

As últimas oito horas de ensaio (Figura 28) apresentam uma pequena redução de temperatura, justificada pelo efeito da presença da água. A assimetria é cada vez menor e, por isso, neste intervalo de ensaio e

nesta área do provete, as temperaturas são semelhantes, como se observa pelo comprimento do bigode superior e inferior dos *boxplots*.

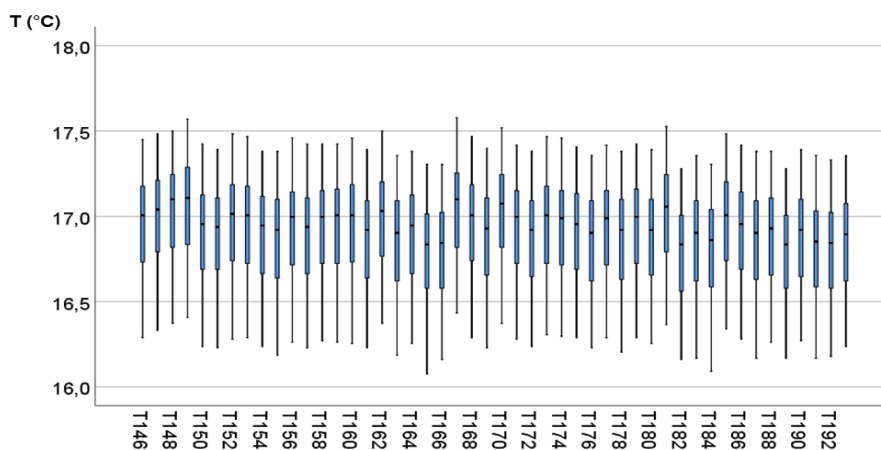


Figura 28 - *Boxplots* dos termogramas relativos às terceiras 8 horas de ensaio na metade superior do provete

Os coeficientes de assimetria, na Figura 29, evidenciam que a assimetria não é constante ao longo do ensaio, o que está relacionado com a humedificação pelo topo não atingir os pontos do provete por igual, isto é, a absorção de água é mais eficaz em alguns pontos do que em outros; daí que a assimetria varie.

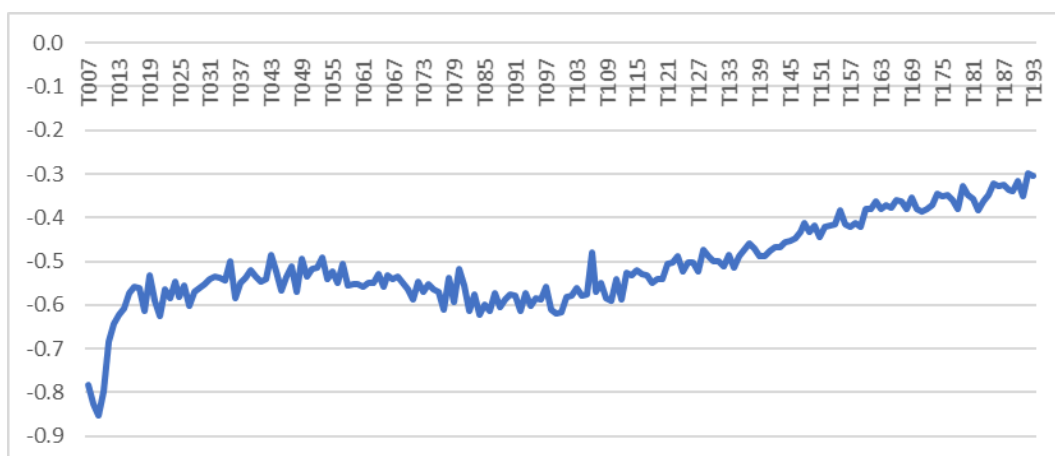


Figura 29 - Representação da evolução dos coeficientes de assimetria durante todo o ensaio na metade superior do provete

As figuras seguintes (Figura 30 a Figura 33), representativas de todo o ensaio, identificam as temperaturas medianas e os intervalos de confiança para as médias de todo o provete em estudo, na fase de humidificação pelo topo.

Embora a amplitude do intervalo de confiança não seja perceptível na Figura 30, devido à variação das temperaturas nesta fase, verifica-se que a média das temperaturas do provete diminui, como esperado; no entanto, observa-se excecionalmente a existência de alguns termogramas em que a sua temperatura média aumenta, facto não associado à presença de água. Os intervalos de confiança para as médias não excedem 0,0052 °C neste conjunto de termogramas.

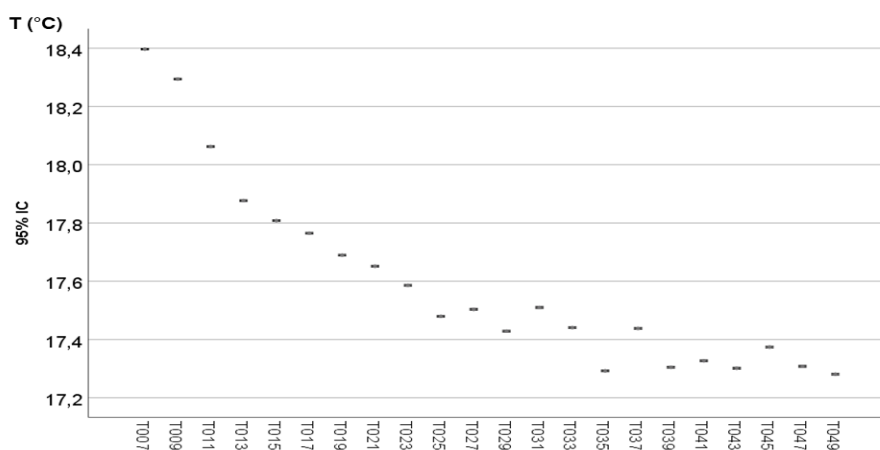


Figura 30 - Intervalos de confiança a 95% da temperatura média dos termogramas nas primeiras 4 horas de ensaio

Na Figura 31 é perceptível que a variação da média das temperaturas dos termogramas é mínima, visto que nesta fase o efeito da água não é tão pronunciado, embora a escala da representação gráfica dê a ilusão de uma elevada variação, pela dispersão observada. Os intervalos de confiança para as médias não excedem 0,057 °C.

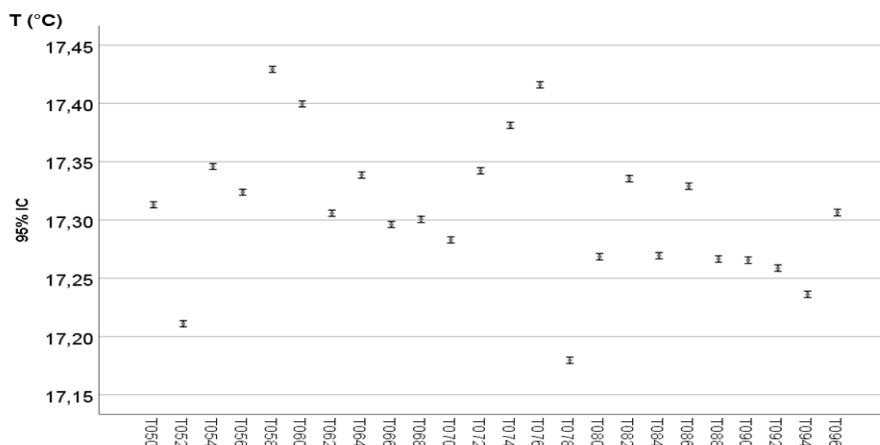


Figura 31 - Intervalos de confiança a 95% da temperatura média dos termogramas nas segundas 4 horas de ensaio

As segundas oito horas de ensaio (Figura 32) evidenciam uma subtil redução de temperatura ao longo do ensaio, como previsível, demonstrada pela representação da temperatura média de cada termograma. A amplitude dos intervalos de confiança para as médias não excede 0,0064 °C.

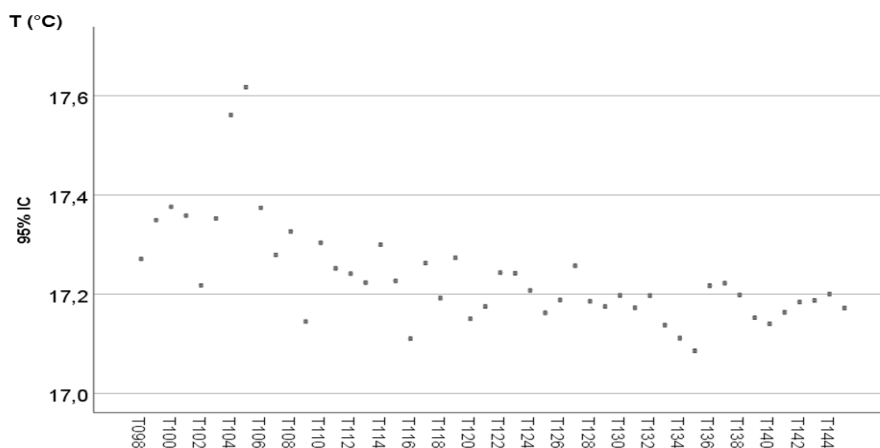


Figura 32 - Intervalos de confiança a 95% da temperatura média dos termogramas nas segundas 8 horas de ensaio

As últimas oito horas de ensaio (Figura 33) apresentam uma diminuição da temperatura média reduzida, pois o efeito da água no topo ainda promove uma redução da temperatura, embora não seja muito acentuada. A amplitude dos intervalos de confiança para as médias não excede 0,0066 °C.

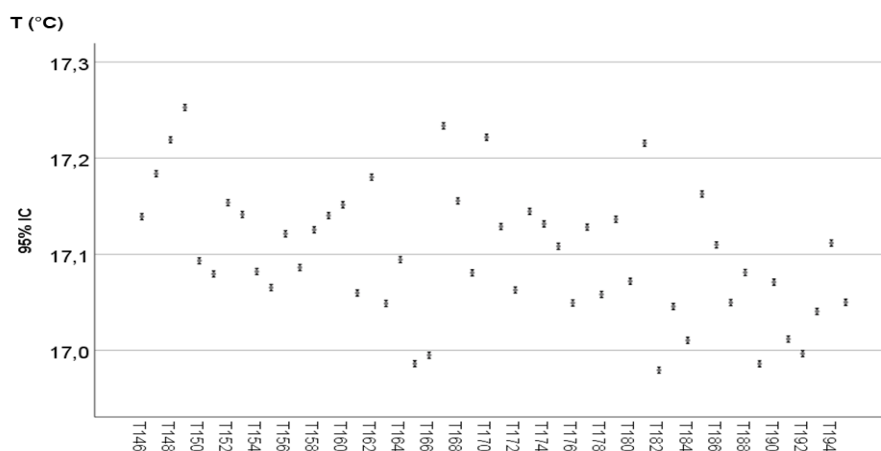


Figura 33 - Intervalos de confiança a 95% da temperatura média dos termogramas nas terceiras 8 horas de ensaio

De forma semelhante à humidificação pela base, a representação da média das temperaturas e o seu respetivo intervalo de confiança, apenas na metade superior do provete, tem o intuito de detetar em pormenor características nessa área.

A Figura 34, representativa do conjunto de dados da zona de interesse, o topo do provete, apresenta uma diminuição da temperatura média, como efeito da humidificação. Os intervalos de confiança para a média, no início do ensaio, possuem valores que não excedem 0,0080 °C.

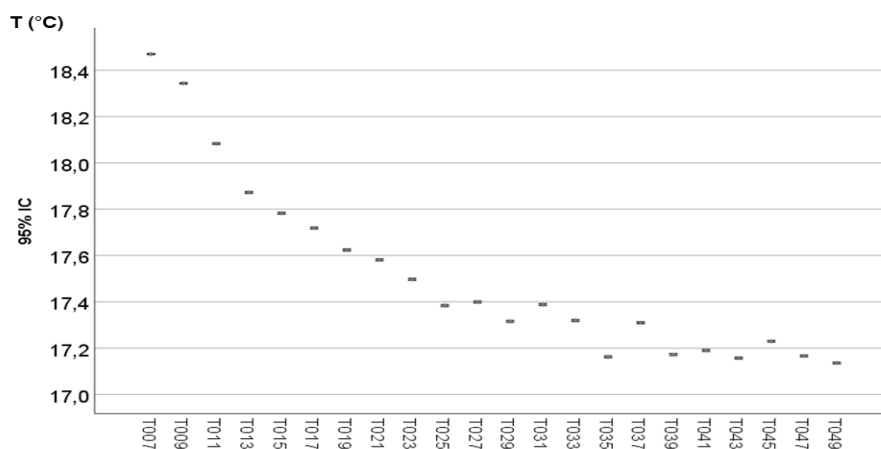


Figura 34 - Intervalos de confiança a 95% da temperatura média dos termogramas nas primeiras 4 horas de ensaio na metade superior do provete

As temperaturas médias da Figura 35 apresentam uma oscilação, que é mais reduzida do que no período de ensaio anterior, devido ao facto de os dados representados apenas serem figurativos do topo do provete. A amplitude dos intervalos de confiança para a média não excede 0.0080 °C.

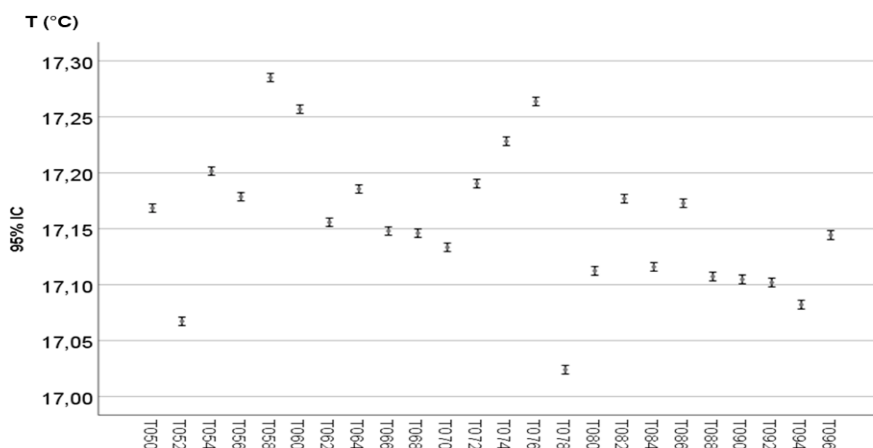


Figura 35 - Intervalos de confiança a 95% da temperatura média dos termogramas nas segundas 4 horas de ensaio na metade superior do provete

Nas segundas 8 horas (Figura 36) vê-se que as temperaturas médias seguem uma tendência para uma variação cada vez menor, pois o topo do provete já se encontra praticamente todo húmido. Ainda assim, verifica-se uma leve diminuição da temperatura ao longo deste intervalo de tempo. Os intervalos de confiança para as médias não excedem 0,0088 °C.

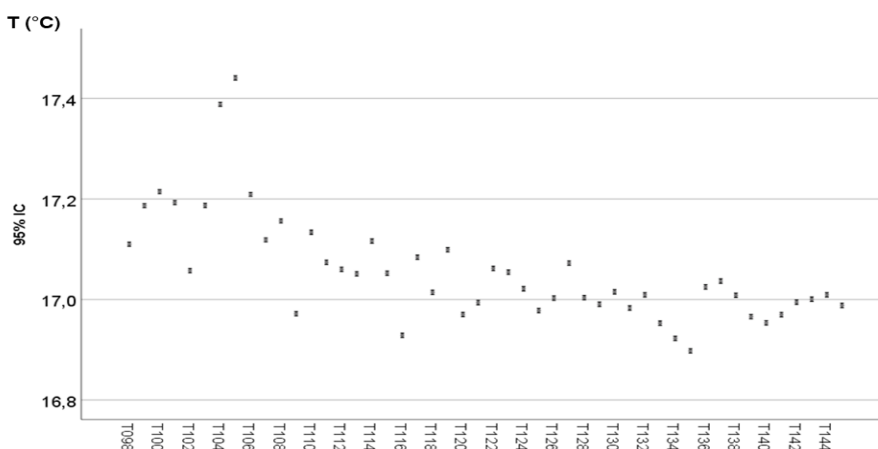


Figura 36 - Intervalos de confiança a 95% da temperatura média dos termogramas nas segundas 8 horas de ensaio na metade superior do provete

Na Figura 37, ilustrativa das últimas 8 horas de ensaio, a variação da média das temperaturas é menor do que no período de ensaio anterior, como esperado, assim como a diminuição da média das temperaturas ao longo do ensaio. A amplitude dos intervalos de confiança para a média não é superior a 0,0090 °C, pois a diferença entre as temperaturas registadas é cada vez menor.

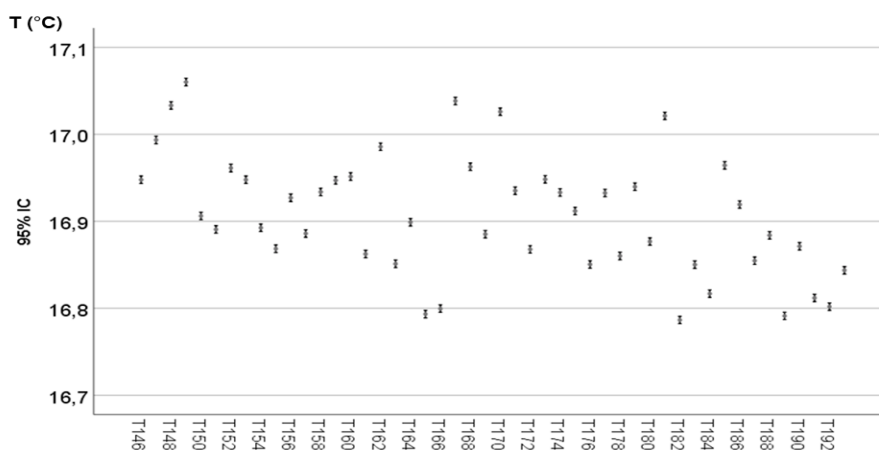


Figura 37 - Intervalos de confiança a 95% da temperatura média dos termogramas nas terceiras 8 horas de ensaio na metade superior do provete

### 4.3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

É possível verificar pela análise dos gráficos anteriores (Figura 5 a Figura 29) que a humedificação pela base e pelo topo do provete cria padrões térmicos distintos. Embora ambas as humedificações originem manchas húmidas em partes opostas do provete, as suas características são diferentes, visto que a absorção não é realizada de igual forma em ambas as faces. Na humedificação pela base, o provete possui 5 faces a absorver água, uma vez que este se encontra embebido em uma lâmina de água, enquanto que na humedificação pelo topo, apenas a face superior se encontra em contacto direto com água.

Como era suposto, ambas as humedificações evidenciam a descida de temperatura ao longo do ensaio, como se comprova pela diminuição da mediana e da distribuição das temperaturas. No entanto, percebe-se que a humedificação pela base atinge temperaturas mais reduzidas e o efeito da água é mais acentuado nesse caso, daí que seja identificada uma maior quantidade de *outliers* nos *boxplots*, devidos aos valores da temperatura serem mais extremos. Na humedificação pelo topo, as temperaturas são mais elevadas, por isso a assimetria não é tão pronunciada como na base e não se regista tanta variabilidade.

Para ambas as humedificações, as amplitudes dos intervalos de confiança para as temperaturas médias com 95% de confiança não apresentam muita variação à medida que o tempo aumenta, uma vez que a variação de temperaturas se torna mais reduzida ao longo do ensaio. As médias das temperaturas



diminuem ao longo do período de ensaio, no entanto, a diminuição é mais evidente na humidificação pela base.



# 5

## HUMIDIFICAÇÃO PELA BASE

### 5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O interesse do estudo prende-se com a análise de componentes principais segundo uma abordagem espacial e temporal, em que o termograma de referência adotado pode ser um instante ou uma posição. No caso da análise considerando o perfil instantâneo, o termograma de referência pode ser médio, final ou inicial e, por isso, é necessário perceber a variabilidade dos seus valores em relação aos outros, com a representação de *boxplots* desses termogramas. Pelo mesmo motivo, adota-se o mesmo procedimento quando o estudo considera as posições média, no topo ou na base (perfil posição).

Assim, pela análise da Figura 38 é possível avaliar os três termogramas de referência para o perfil instantâneo. O termograma inicial (T004) está associado às temperaturas mais elevadas, uma vez que se relaciona com o início da humidação do provete, daí que se verifique a presença de *outliers*, dado que é o momento onde existe uma maior discrepância de valores entre a base e o topo do provete. No termograma final (T193) o provete encontra-se praticamente todo húmido, daí que se encontrem as temperaturas mais reduzidas ao longo do ensaio e que se verifique maior homogeneidade nas temperaturas. Consequentemente, pela mesma figura, percebe-se que o perfil instantâneo médio apresenta temperaturas mais próximas do termograma final T193, visto que o provete se encontra em constante humidação, daí que na maior parte do tempo registre temperaturas mais baixas.

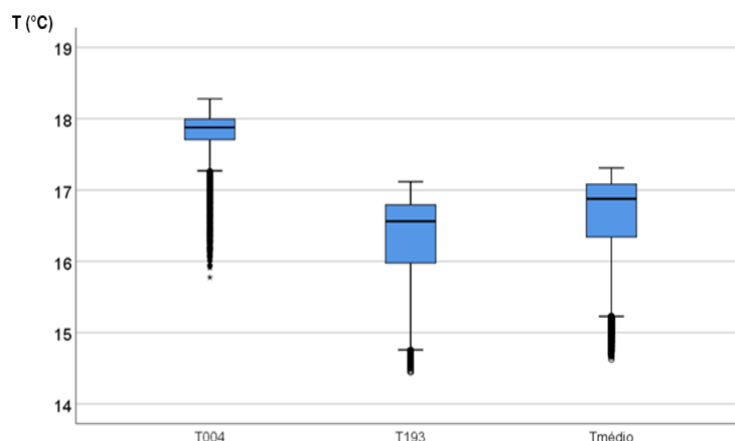


Figura 38 - Representação dos *boxplots* dos perfis instante de referência da humidificação pela base

Pela observação da Figura 39 percebe-se que a posição da base regista temperaturas mais reduzidas, como esperado. Ao contrário, o topo encontra-se mais seco, daí que a suas temperaturas sejam mais elevadas, dado que a humidificação é pela base do provete. Já a posição média apresenta um comportamento mais próximo do da posição do topo, o que significa que a macha húmida só atingiu este nível mais próximo do final do ensaio e, portanto, na maioria dos termogramas a posição média ainda está seca.

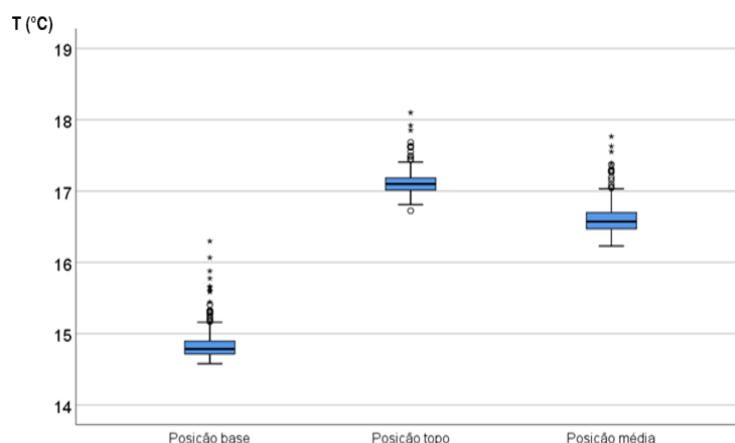


Figura 39 - Representação dos *boxplots* dos perfis posição de referência da humidificação pelo topo

## 5.2. ABORDAGEM TEMPORAL

### 5.2.1. SUBTRAÇÃO DO PERFIL POSIÇÃO

A aplicação da análise de componentes principais ao conjunto de temperaturas resulta num conjunto de componentes principais, como já descrito. Essas componentes principais estão relacionadas com o termograma de referência subtraído e, por isso, nas imagens térmicas conseguidas identificam-se diferentes padrões, alguns característicos do efeito da humedificação, outros não, daí que nem todas as imagens de referência (perfis) se ajustam a esta análise.

Na subtração de uma posição da base ao conjunto de todas as posições, a imagem resultante evidencia a existência de uma mancha de água na base do provete, associada à sua humedificação. A presença de água, não afeta apenas a base, mas também zonas superiores, como se verifica pela representação de diferentes áreas na Figura 40. A mancha húmida atinge então um nível correspondente a cerca de 1/3 da altura do provete, ou seja, cerca de 7 cm acima do nível da água. Por outro lado, também se observam diferentes níveis de humedificação do provete, com uma zona mais húmida situada entre a base e cerca de 3 cm acima do nível da água.

A subtração desta posição origina uma imagem igual à obtida pela subtração da posição média (Figura 40 (b)) e da posição do topo (Figura 40(c)), visto que ao subtrair uma posição da base às restantes posições da matriz resulta uma matriz que é semelhante à obtida pela subtração das outras posições, pois o valor dessa diferença é semelhante e próximo de zero em todos os casos. Nestes três casos apenas se obtém uma componente principal, que é capaz de explicar cerca de 99% da variância.

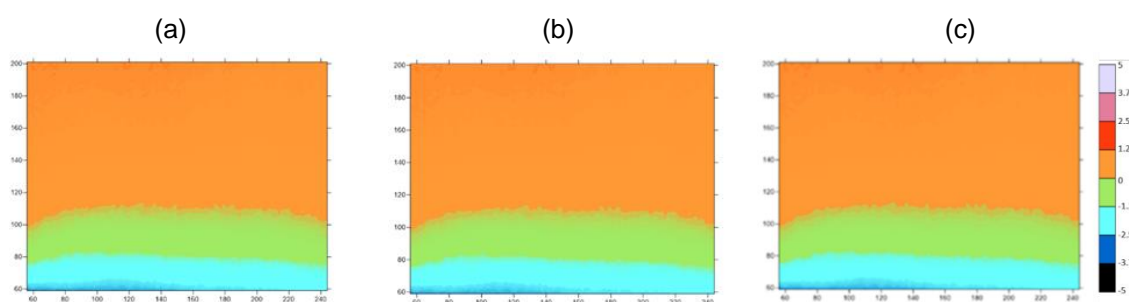


Figura 40 – CP1 da subtração de uma posição da base (a), média (b) e do topo (c) às restantes posições

### 5.2.2. SUBTRAÇÃO DO PERFIL INSTANTE

Pela subtração do termograma final (T193) ao conjunto de termogramas, resultam 4 componentes principais ilustradas na Figura 41. Na primeira componente principal constata-se que as temperaturas da base são mais altas, isto é, na base registam-se as maiores diferenças de temperatura com valor positivo, o que significa que uma percentagem significativa de imagens tem temperaturas superiores ao

ao termograma de referência. É por isso possível identificar quais as áreas mais afetadas pela humedificação através da primeira componente. Relativamente às restantes componentes, não é fácil associá-las ao fenómeno de humedificação, o que pode resultar da variância explicada ser muito menor do que a da primeira componente, como se demonstra na Figura 42. Podem, por isso, traduzir um ruído resultante de um factor externo à medição, que poderá estar associado à circulação de ar dentro da câmara climática [22], que não é homogénea, originando padrões térmicos que não estão relacionados com a humidade.

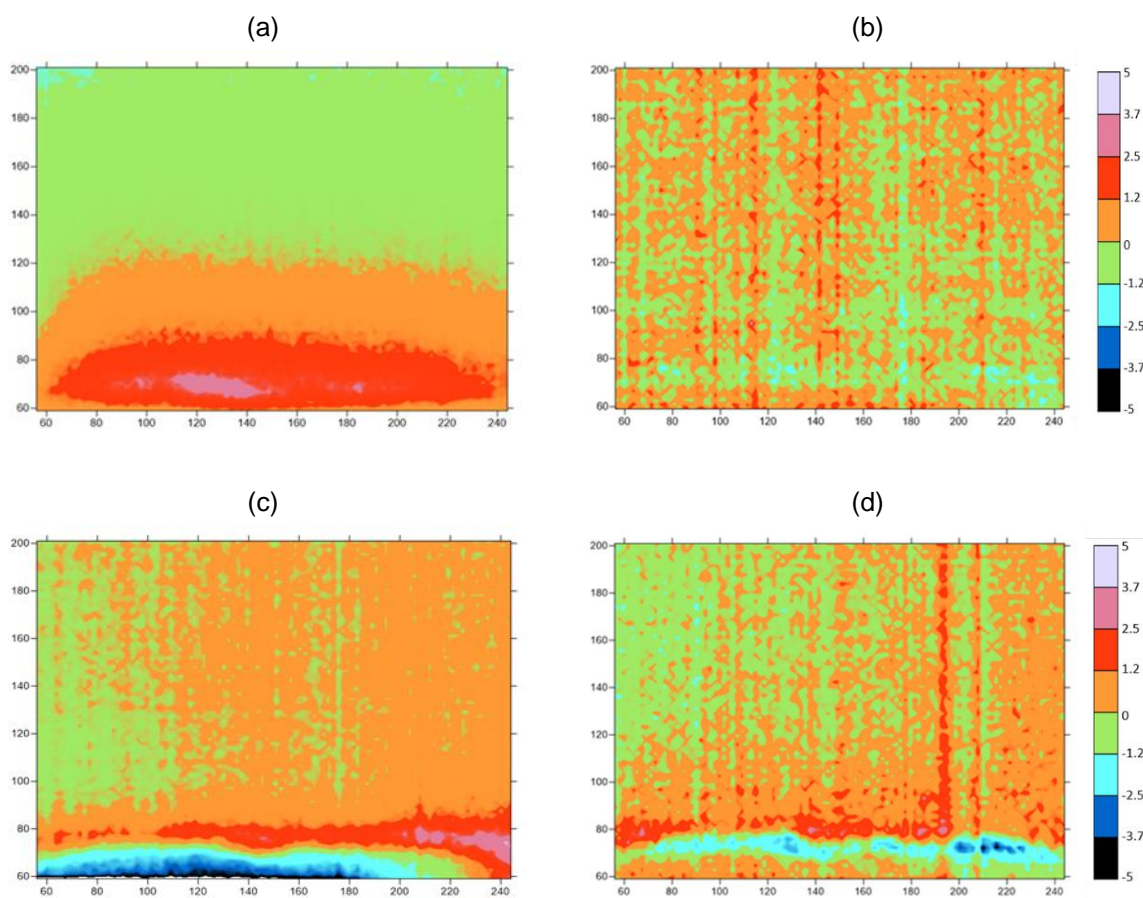


Figura 41 - CP1 (a), CP2 (b), CP3 (c), CP4 (d) da subtração do termograma final aos termogramas das 24 horas (BTI 0-24f)

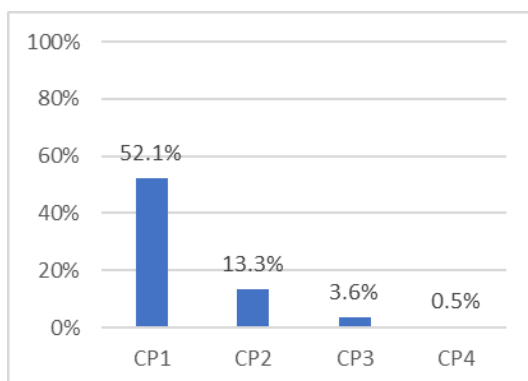


Figura 42 - Variância explicada pelas CPs (BTI 0-24h)

A Figura 43 mostra as componentes principais quando o perfil instantâneo é o termograma inicial (T004). A representação da primeira componente principal revela na base uma mancha associada às maiores variações de temperatura, isto é, a área azul representa as diferenças de temperatura mais significativas com valor negativo, visto que, relativamente ao termograma inicial (T004), as restantes temperaturas possuem um valor inferior. As outras manchas também se relacionam com a existência de água; no entanto, essas zonas possuem maior homogeneidade, dado que quanto mais próximo do topo, menores os efeitos provocados pela humedificação. Da segunda componente principal, como a percentagem de variância explicada é muito reduzida (Figura 44), não se pode identificar correspondência entre o fenómeno e as regiões da imagem.

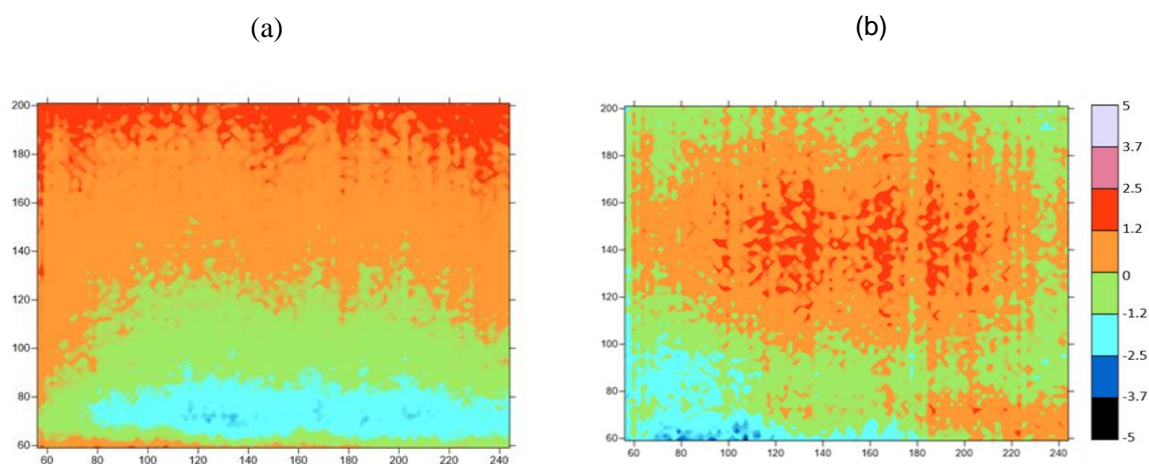


Figura 43 - CP1 (a) e CP2 (b) da subtração do termograma inicial aos termogramas das 24 horas (BTI 0-24h)

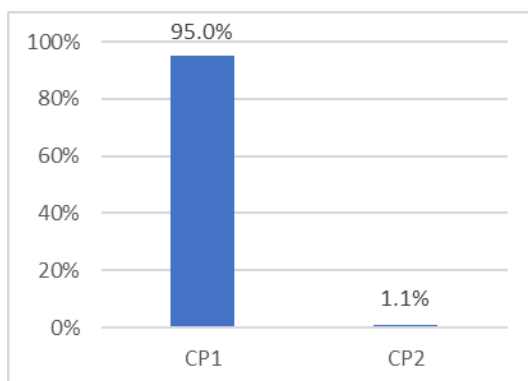


Figura 44 - Variância explicada pelas CPs (BTI 0-24i)

As componentes principais da Figura 45, obtidas pela subtração do perfil instante médio, não são conclusivas nem permitem explicar de uma forma clara a humedificação, visto que as imagens apresentam muitos padrões característicos de perturbação. Isto pode estar relacionado com o facto de o perfil médio não ser uma boa referência e, por isso, não ser eficaz para descrever o fenómeno. Por esse motivo e pelo facto de a variância explicada ser apenas de 42 %, na primeira componente principal (Figura 46), na base da imagem identificam-se regiões com diferenças positivas e negativas, o que não permite traduzir corretamente o fenómeno.



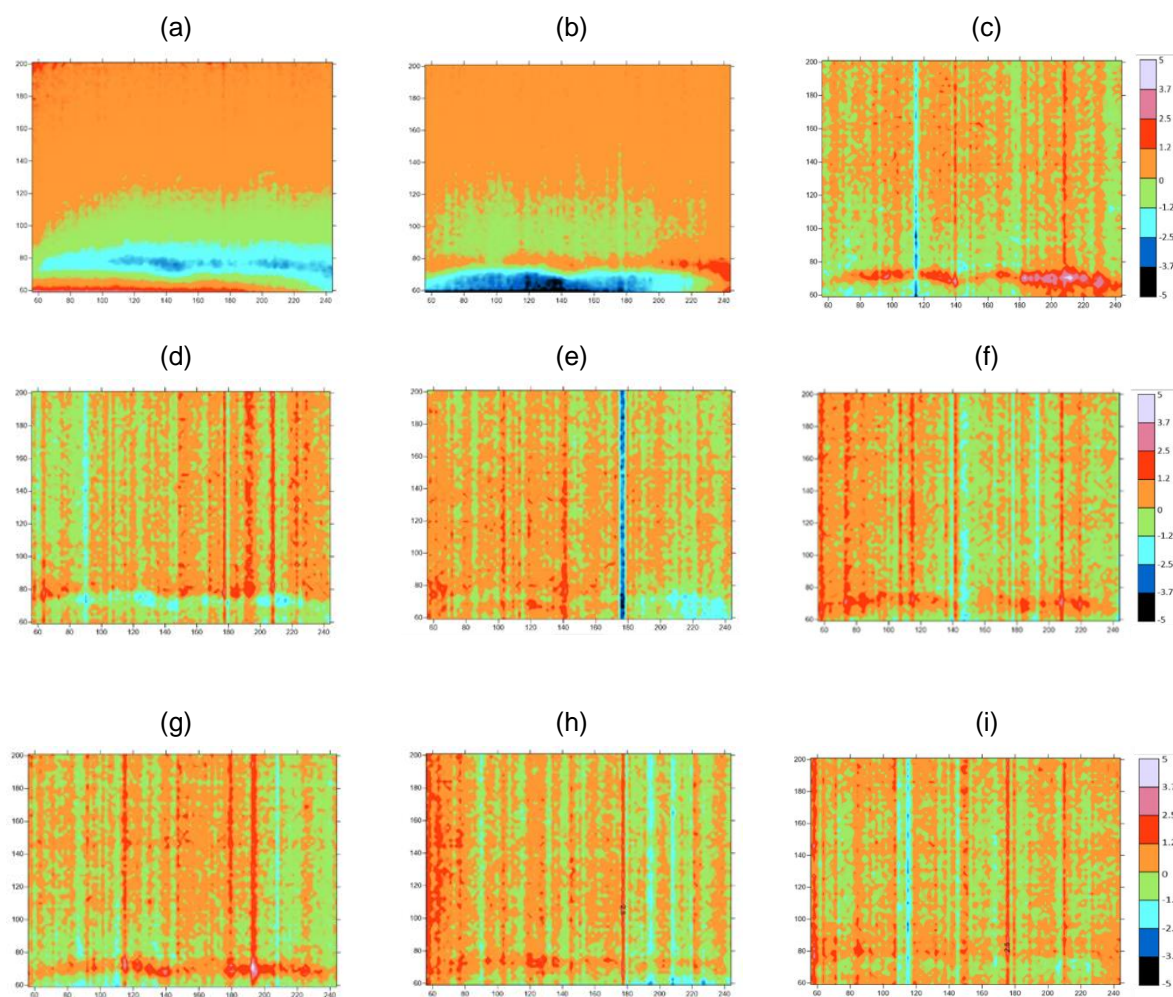


Figura 45 - CP1 (a), CP2 (b), CP3 (c), CP4 (d), CP5 (e), CP6 (f), CP7 (g), CP8 (h) e CP9 (i) da subtração do perfil instante médio aos termogramas das 24 horas (BTI 0-24m)

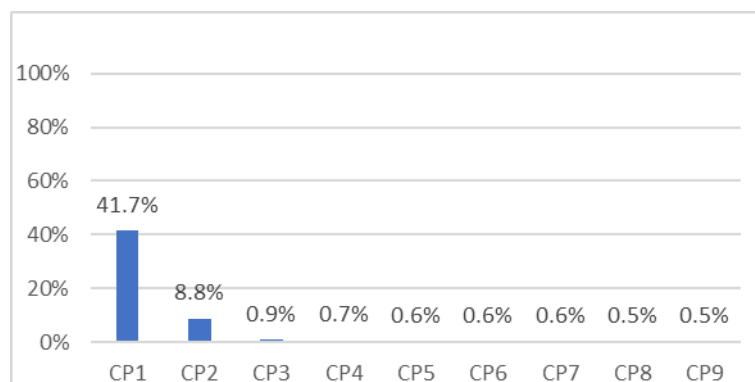


Figura 46 - Variância explicada pelas CPs (BTI 0-24m)

A primeira componente principal da Figura 47 indica a área mais afetada pela variação de temperatura, isto é, a maior diferença de temperatura registada, assinalada com a mancha vermelha. Esta diferença é positiva devido ao termograma de referência (termograma final) se encontrar mais frio e com temperaturas mais baixas do que as registadas nas primeiras 8 horas. A segunda componente principal tem uma percentagem de variância explicada reduzida, pelo que não permite representar corretamente o fenómeno da humidificação (Figura 48).

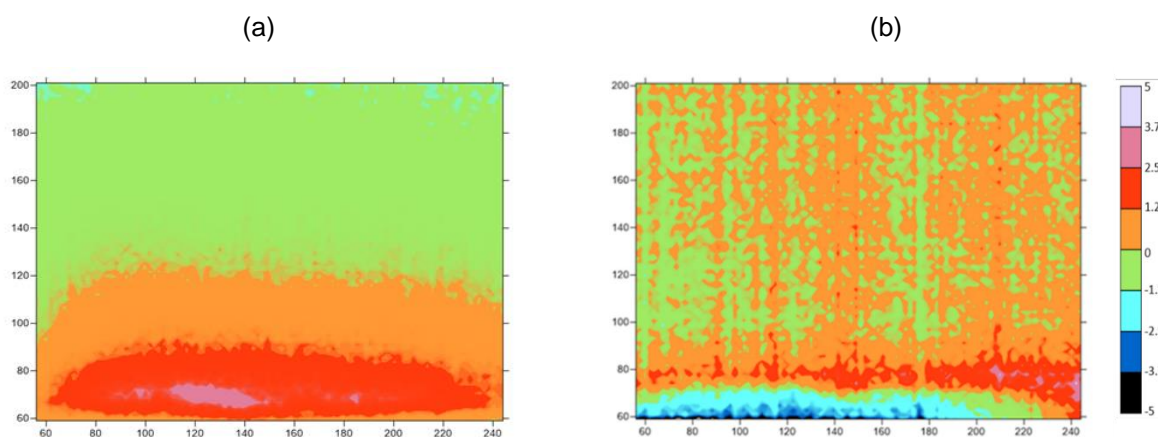


Figura 47 – CP1 (a) e CP2 (b), da subtração do termograma final aos termogramas das primeiras 8 horas (BTI 0-8f)

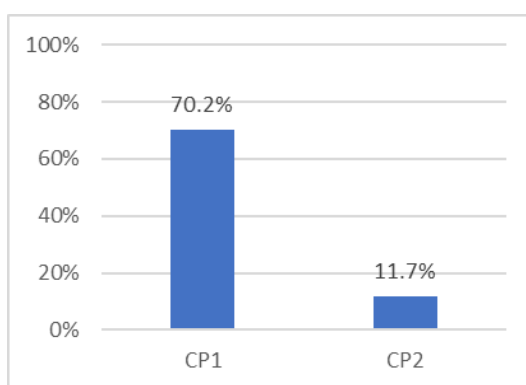


Figura 48 - Variância explicada pelas CPs (BTI 0-8f)

A primeira componente principal da Figura 47, resultante da subtração do instante final (T193), origina diferenças positivas, resultantes da presença da água. Pela observação da Figura 49, consegue-se verificar a tendência da diminuição da temperatura ao longo das primeiras 8 horas de ensaio, o que está relacionado com a absorção de água pelo provete e, por isso, na primeira componente principal são

percetíveis as zonas afetadas por esse efeito. O termograma final (T193) regista as temperaturas mais reduzidas, daí que a subtração às primeiras 8 horas resulte em valores positivos.

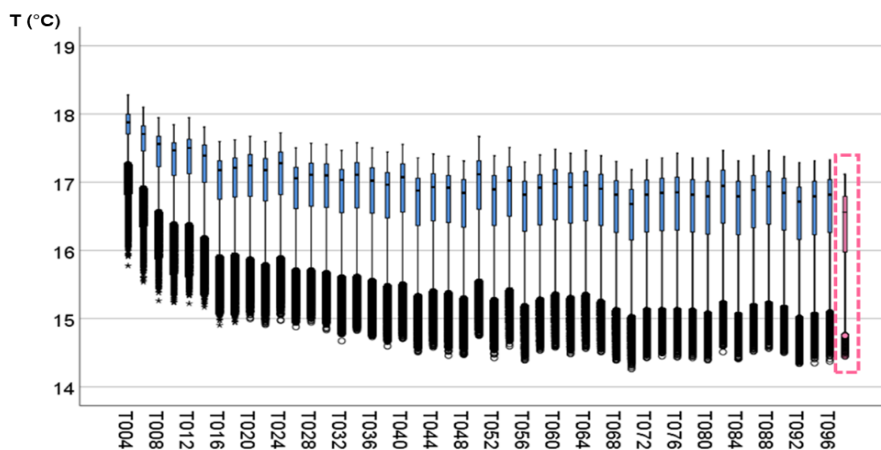


Figura 49 - Representação dos *boxplots* dos termogramas das primeiras oito horas e do último termograma (T193)

Como o termograma inicial (T004) é o termograma de referência e as temperaturas ao longo do ensaio possuem uma tendência para diminuir, as diferenças de temperatura são negativas; daí a mancha da zona mais afetada pela humidificação estar associada a tons frios na Figura 50. Como as variações mais significativas ocorrem nas primeiras 8 horas, a primeira componente principal consegue explicar de forma eficaz o fenómeno; já a segunda componente principal, com uma percentagem muito reduzida de variância explicada, apresenta uma imagem térmica com elevada perturbação (Figura 51).

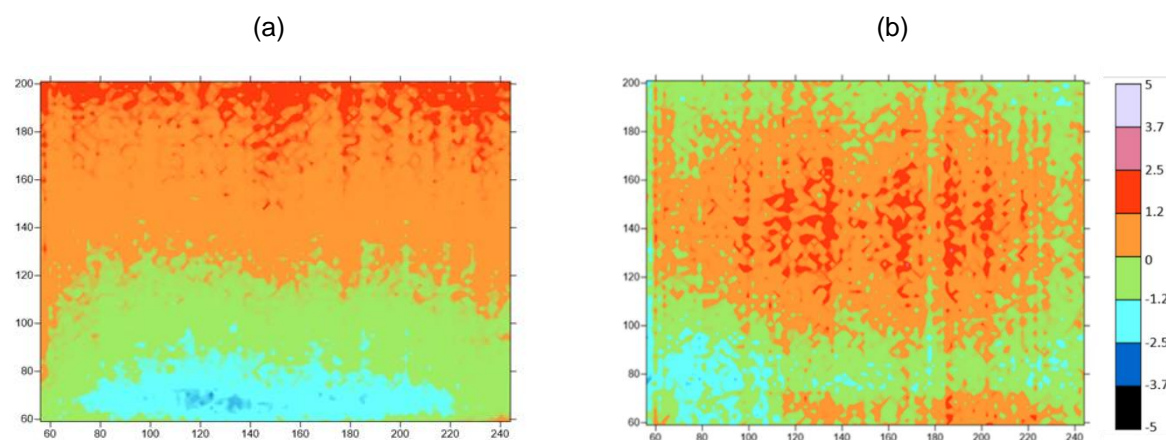


Figura 50 - CP1 (a) e CP2 (b), da subtração do termograma inicial aos termogramas das primeiras 8 horas (BTI<sub>0-8h</sub>)

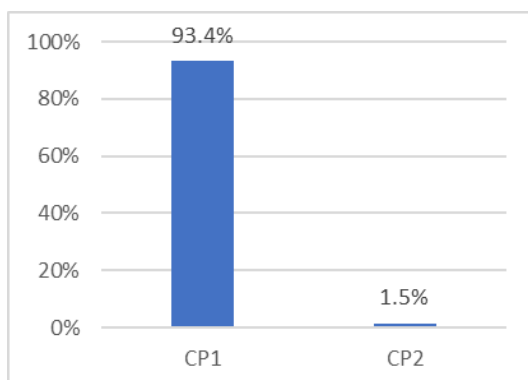


Figura 51 - Variância explicada pelas CPs (BTI 0-8i)

Como já analisado anteriormente, as temperaturas do perfil médio aproximam-se das do termograma final e, por esse motivo, a representação da primeira componente principal, na Figura 52, é muito semelhante à representação dessa componente na Figura 47 (o perfil instantâneo é o termograma final). Neste caso, a subtração do perfil médio consegue de alguma forma explicar o fenómeno da humidificação, visto que as primeiras 8 horas são as mais representativas. No entanto, a imagem apresenta algumas perturbações que não correspondem ao efeito da humidificação, como as diferenças negativas no topo da imagem. Na segunda e terceira componentes principais é possível identificar uma área húmida, com diferenças de temperaturas negativas, que indicam que existem termogramas onde as temperaturas na base são inferiores às do perfil instantâneo médio nessa zona, que poderão corresponder às imagens captadas na fase final das primeiras 8 horas. As duas últimas componentes apresentam uma variância explicada muito reduzida, como demonstra a Figura 53.

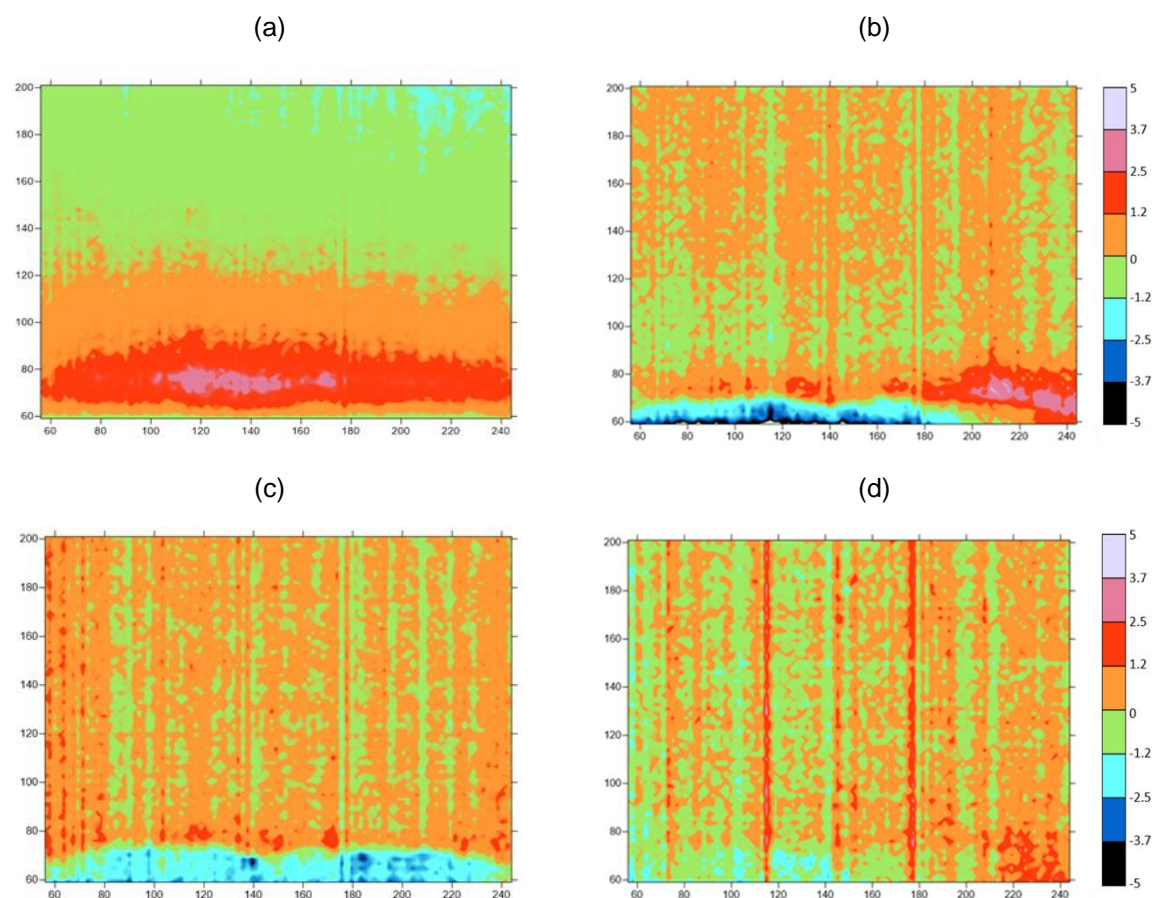


Figura 52 - CP1 (a), CP2 (b), CP3 (c) e CP4 (d) da subtração do perfil instante médio aos termogramas das primeiras 8 horas (BTI<sub>0-8m</sub>)

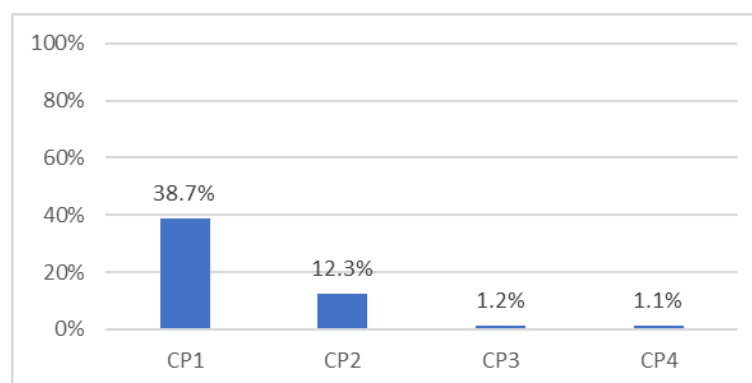


Figura 53 - Variância explicada pelas CPs (BTI<sub>0-8m</sub>)

A representação das componentes principais resultantes dos termogramas captados nas segundas 8 horas subtraídos pelo termograma final (Figura 54) não permite identificar de forma clara a variação da temperatura resultante da humidificação. Tal facto, permite concluir que, a partir das primeiras 8 horas,



o fenómeno de humedificação estabiliza. Como as variáveis se encontram muito correlacionadas devido à maior homogeneidade nos dados (a partir das primeiras 8 horas os termogramas são todos muito semelhantes), a aplicação ACP não é tão eficaz para destacar o fenómeno. A variância explicada por cada uma das componentes não é muito elevada, como demonstra a Figura 55, daí que não seja possível associar eficazmente o fenómeno às imagens térmicas.

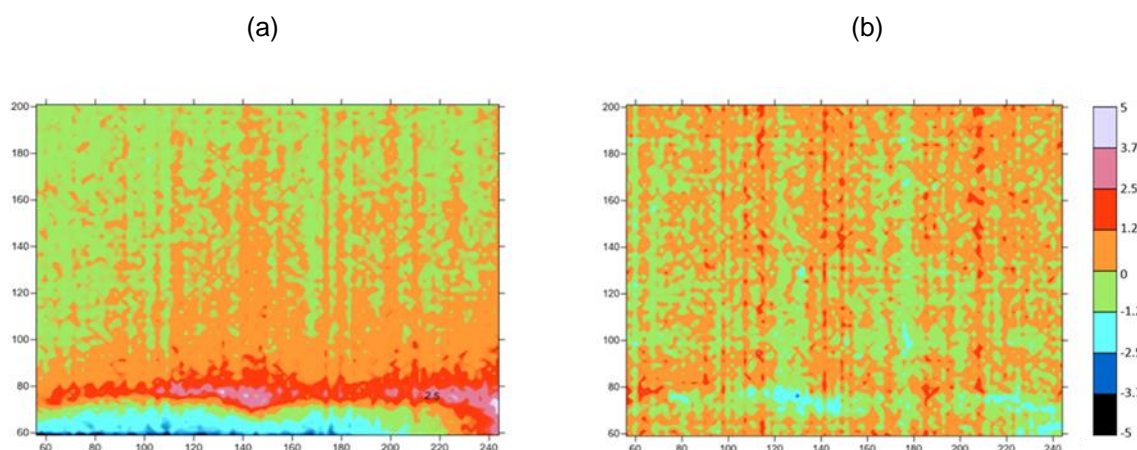


Figura 54 – CP1 (a) e CP2 (b) da subtração do termograma final aos termogramas das segundas 8 horas (BTI 8-16f)

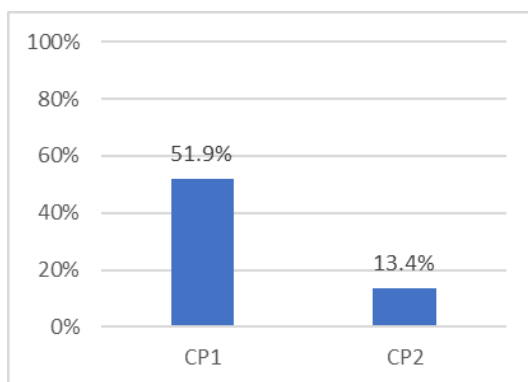


Figura 55 - Variância explicada pelas CPs (BTI 8-16f)

A subtração do termograma inicial aos termogramas das segundas 8 horas, origina apenas uma componente principal representada na Figura 56, com cerca de 98 % de variância explicada. A mancha de tom mais frio também está relacionada com a área de maior variação de temperaturas, o que significa

que as diferenças são maioritariamente negativas, visto que as temperaturas no termograma inicial são mais elevadas do que as temperaturas nos termogramas captados nas restantes 8 horas de ensaio. A área verde também está associada à posição da água, dado que ao longo do ensaio, a mancha de água tende a aumentar. É ainda possível identificar zonas mais secas no provete, mais próximas do seu topo.

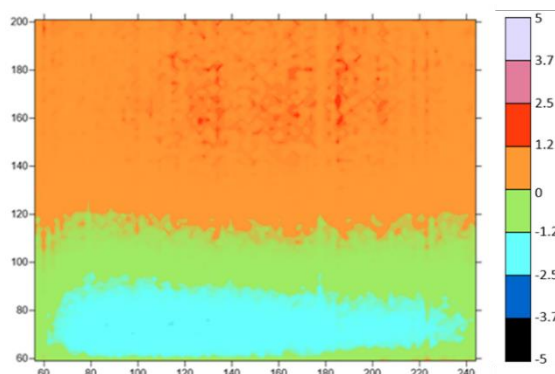


Figura 56 - CP1 da subtração do termograma inicial aos termogramas das segundas 8 horas (BTI<sub>8-16i</sub>)

Na primeira componente principal, na Figura 57, embora a subtração do perfil médio não apresente resultados conclusivos para todo o período de ensaio, nas segundas 8 horas, é possível identificar a área onde se encontram as maiores diferenças de temperatura com tons mais quentes, visto que as temperaturas nas segundas 8 horas são superiores às temperaturas do perfil médio. Na segunda componente, com uma percentagem de variância explicada muito reduzida (Figura 58), alguns padrões indicam a presença de água, mas com temperaturas inferiores às do perfil médio.

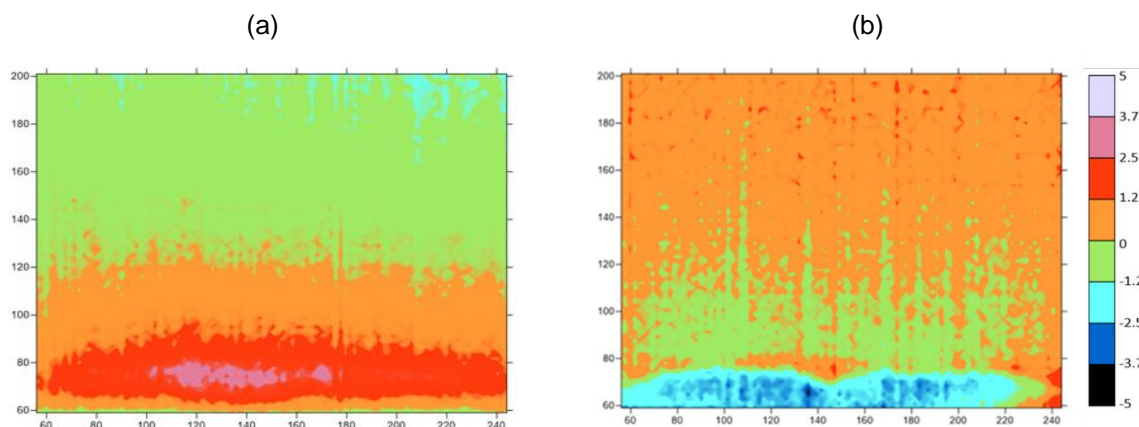


Figura 57 - CP1 (a) e CP2 (b) da subtração do perfil instante médio aos termogramas das segundas 8 horas (BTI<sub>8-16m</sub>)

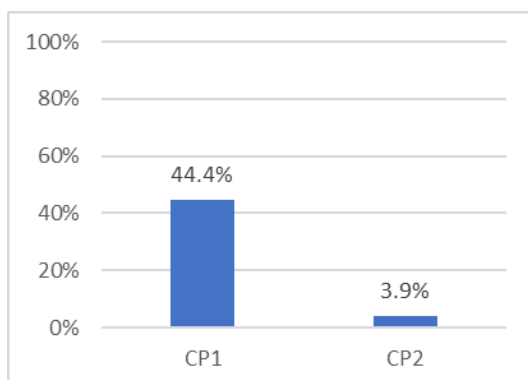


Figura 58 - Variância explicada pelas CPs (BTI 8-16m)

A representação das componentes principais resultantes da subtração dos termogramas das terceiras 8 horas ao termograma final, na Figura 59, não permite extrair conclusões, uma vez que nesta fase as variáveis se encontram muito correlacionadas e, por isso, existe homogeneidade nos valores da temperatura. A variância explicada por esta componente também não é muito significativa, com o valor de 52%.

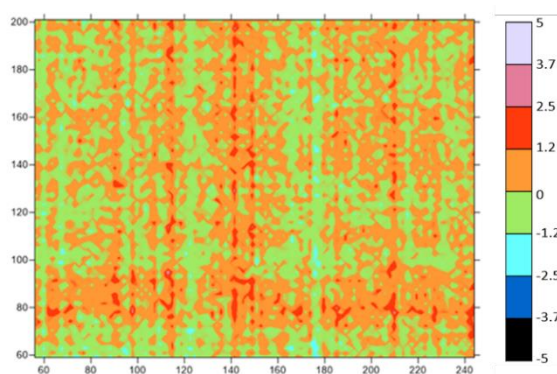


Figura 59 - CP1 da subtração do termograma final aos termogramas das terceiras 8 horas (BTI 16-24f)

A representação das componentes principais resultantes da subtração dos termogramas das terceiras 8 horas ao termograma inicial (Figura 60), permite identificar a área do provete mais afetada pela água, uma vez que nas últimas horas de ensaio é quando a mancha é maior, e o nível atingido pela água também é o mais elevado ao longo do ensaio. Por esse motivo, há uma diferença significativa destes



termogramas face ao inicial, o que permite uma representação fiável do fenómeno de humidificação, o que é comprovado pelo facto de a única componente principal explicar cerca de 98% da variância total.

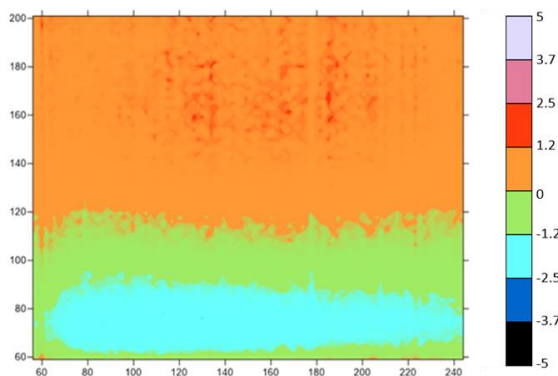


Figura 60 - CP1 da subtração do termograma final aos termogramas das terceiras 8 horas (BTI<sub>16-24i</sub>)

Mais uma vez, a subtração do perfil instante médio aos termogramas captados nas terceiras 8 horas não permite avaliar de uma forma muito eficaz o comportamento do provete, visto que é possível identificar áreas na base da imagem com diferenças de temperatura positivas e negativas (Figura 61). Os termogramas finais deviam apresentar as temperaturas mais reduzidas na base do provete, dado que é o período em que o provete se encontra mais humidificado. No entanto, o que se verifica é que há zonas onde o termograma T193 apresenta temperaturas superiores a alguns termogramas do intervalo das últimas 8 horas e, por isso, a única componente obtida, com 56 % de variância explicada, apresenta maioritariamente diferenças negativas.

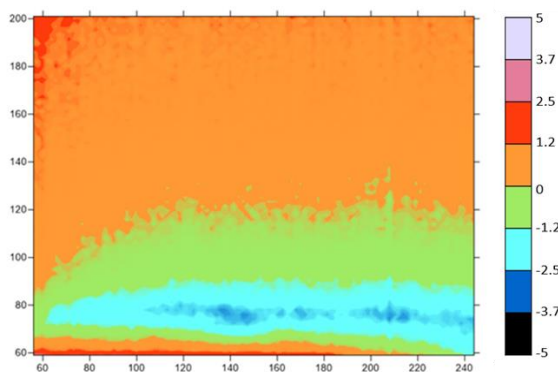


Figura 61 - CP1 da subtração do perfil instante médio aos termogramas das terceiras 8 horas (BTI<sub>16-24m</sub>)

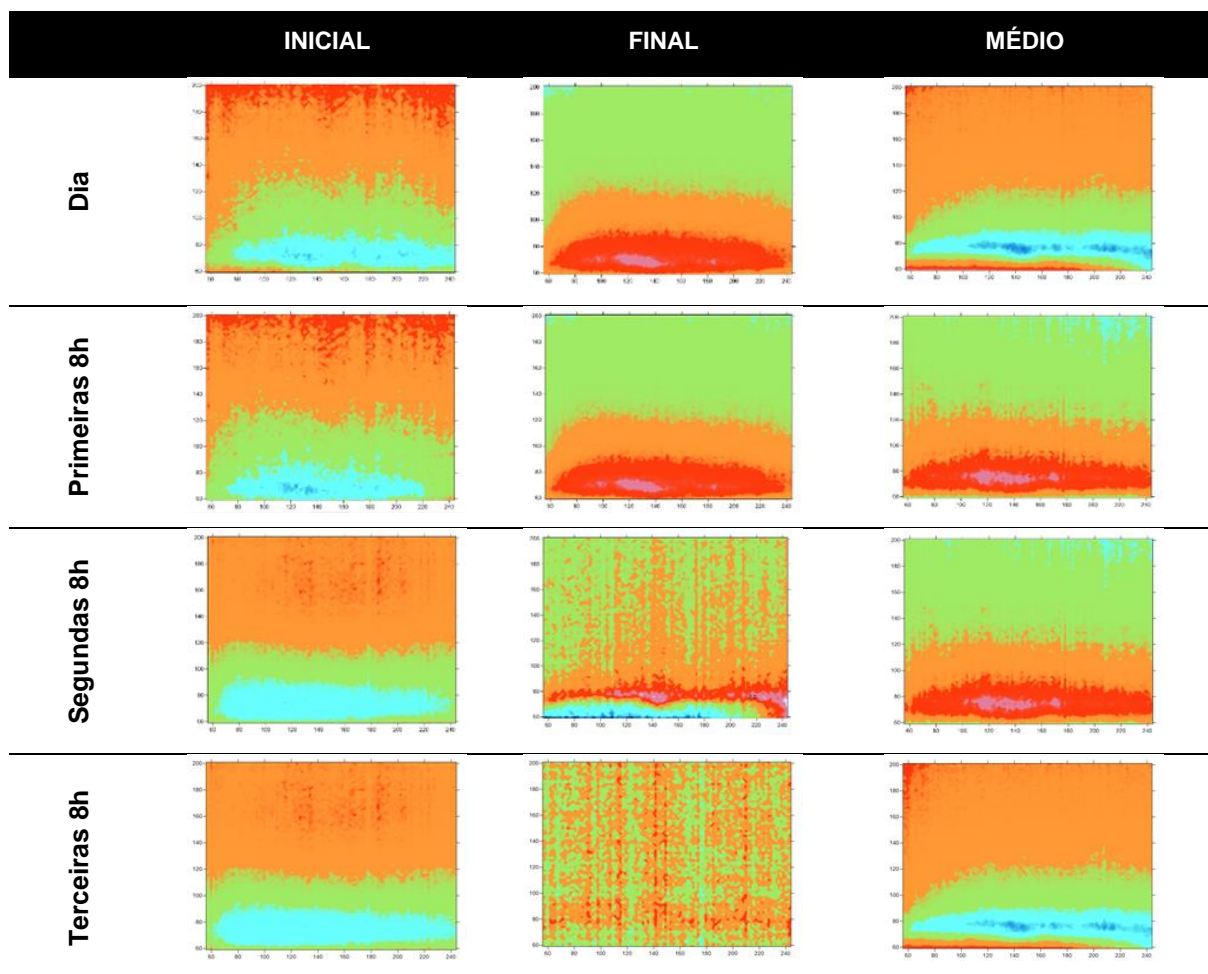
No Quadro 1 é possível observar a primeira componente principal resultante da subtração do termograma inicial, final e médio à série de dados, com o intuito de estabelecer uma comparação entre esses casos e perceber qual o termograma de referência mais adequado para ajudar a descrever o fenómeno.

Pela observação das imagens térmicas, na subtração do instante inicial a todo o período do ensaio consegue-se identificar as áreas afetadas pela água, assim como o nível atingido por esta. É possível ainda localizar zonas com as maiores diferenças de temperatura entre o instante inicial e o restante tempo de ensaio, bem como a intensidade de evaporação, por isso, esta subtração apresenta os melhores resultados. Observa-se ainda que a mancha azul aumenta das primeiras 8 horas para as restantes; já a mancha verde sofre uma estabilização, visto que o nível de intensidade de humedificação não progride mais.

A subtração do termograma final (T193) aos termogramas resultantes de um dia de ensaio, permite eliminar a variabilidade do início e, por isso, também descreve de forma eficaz o fenómeno. As imagens obtidas possuem cores representativas de valores opostos aos das imagens obtidas pela subtração do instante inicial, pelo facto de as diferenças serem neste caso positivas. A subtração deste termograma permite identificar qual o período de tempo relevante para o ensaio e, a partir de que intervalo de tempo a análise passa ser irrelevante. Por isso, entende-se que após as primeiras 8 horas, os mapas de cores possuem perturbações, daí que não há interesse em avaliar o comportamento após esse período.

A subtração do perfil médio é o menos eficaz, dado que não permite representar o fenómeno de uma forma clara, uma vez que não se tem a certeza da sua localização no tempo. As primeiras 8 horas são as mais representativas do fenómeno de humedificação, uma vez que regista a maior variação de temperatura. Quando se avalia apenas este período, a subtração do perfil médio permite identificar o fenómeno de uma forma mais eficaz do que quando se analisam as 24 horas de humedificação. Neste período, o mapa de cores é semelhante ao obtido quando se faz a subtração do termograma final, visto que as temperaturas do perfil médio se encontram próximas das do termograma final.

Quadro 1 - Primeira componente principal considerando todos os perfis instante da humidificação pela base



Pela análise das imagens anteriores foi possível avaliar a evolução da mancha húmida ao longo do tempo, através da representação das componentes principais obtidas pelas diferenças com um termograma de referência. Para avaliar o efeito dessa subtração, aplicou-se a análise de componentes principais ao conjunto de termogramas originais, isto é, diretamente aos valores de temperatura em cada instante do provete, obtendo-se apenas uma componente principal, que está representada na Figura 62. Nesta imagem é possível reconhecer 4 áreas associadas a cores distintas que definem a quantidade de água (líquida ou em fase de vapor) em cada nível do provete. Assim, na base, na zona em contacto com a lâmina de água, registam-se as temperaturas mais reduzidas, aumentando o seu valor até ao topo, onde se encontram valores mais elevados e onde o provete está seco. Verifica-se que, comparativamente às imagens em que os perfis instante foram subtraídos, o nível mais alto que se associa à presença de água está a uma cota inferior. Este facto indica que, para este tipo de fenómeno, é fundamental a subtração a um perfil instante para que se possam eliminar eventuais ruídos nas medições, que podem mascarar os reais efeitos da humidificação.

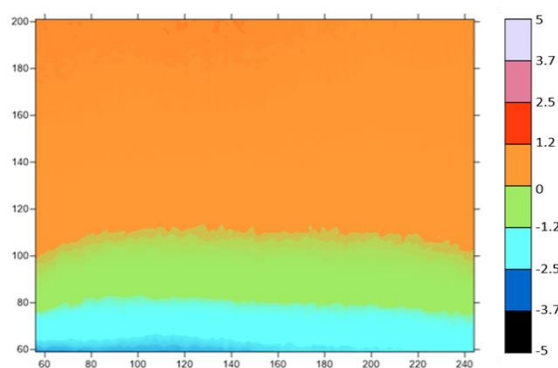


Figura 62 - CP1 da ACP aplicada aos termogramas originais

Pela análise do Quadro 2 é possível verificar que a maior variância explicada ocorre quando se realiza a subtração do termograma inicial aos restantes termogramas da série de dados, uma vez que o instante inicial regista maior discrepância nas suas temperaturas, como já analisado. Por isso, ao subtrair este instante originam-se as maiores diferenças, o que não acontece quando se consideram os outros perfis instantes, sendo por isso possível explicar maioritariamente a variância ocorrida nos dados com poucas componentes principais. Assim, conclui-se que o termograma inicial é o perfil instante que permite obter melhores resultados.

A subtração do perfil instante final também consegue explicar grande parte da variância; no entanto, como as diferenças de temperaturas já não são tão significativas e existe maior correlação entre os dados, as imagens não conseguem evidenciar de forma clara as zonas humidificadas.

Em geral, a subtração do perfil instante médio não é uma boa opção, visto que a variância explicada é quase sempre inferior à dos restantes perfis de referência. Embora com esta subtração se consiga originar um número elevado de componentes principais, na maioria dos casos não é possível obter informação útil a partir delas.

Quadro 2 – Número de componentes principais e respetiva variância explicada

	Número de componentes principais (CPs)	% de variância explicada
<b>BTP<sub>b</sub></b>	1	98,98
<b>BTP<sub>m</sub></b>	1	98,98
<b>BTP<sub>t</sub></b>	1	98,98
<b>BTI<sub>0-24f</sub></b>	4	69,54
<b>BTI<sub>0-24i</sub></b>	2	96,60
<b>BTI<sub>0-24m</sub></b>	9	49,09
<b>BTI<sub>0-8f</sub></b>	2	82,65
<b>BTI<sub>0-8i</sub></b>	2	95,34
<b>BTI<sub>0-8m</sub></b>	4	41,93
<b>BTI<sub>8-16f</sub></b>	2	62,54
<b>BTI<sub>8-16i</sub></b>	1	97,90
<b>BTI<sub>8-16m</sub></b>	3	42,40
<b>BTI<sub>16-24f</sub></b>	1	52,10
<b>BTI<sub>16-24i</sub></b>	1	98,28
<b>BTI<sub>16-24m</sub></b>	1	60,71

### 5.2.3. ANÁLISE DE SCORES

Com os valores dos *scores* é possível obter informação sobre a composição das componentes principais e a sua representação gráfica evidencia a variabilidade dos dados da primeira componente principal em relação às restantes. O aglomerado de pontos permite identificar a relação entre as CPs e uma determinada região da imagem térmica [20].

A Figura 63 representa os *scores* da primeira componente principal em função das restantes três, quando o termograma final é subtraído à série total de dados (termogramas das 24 horas). Observa-se que a primeira componente principal tem mais valores positivos do que negativos, o que significa que na representação da sua imagem existem mais diferenças positivas. É possível também identificar que o maior valor absoluto dos *scores* se encontra no eixo dos yy, pois na representação das imagens da segunda, terceira e quarta componentes principais pode-se observar diferenças mais acentuadas de temperatura do que na primeira. Em geral, a Figura 63 demonstra que a amostra de dados é muito concentrada, visto que o intervalo de variação de *scores* nas componentes em análise é muito semelhante, o que revela muito pouca variância.

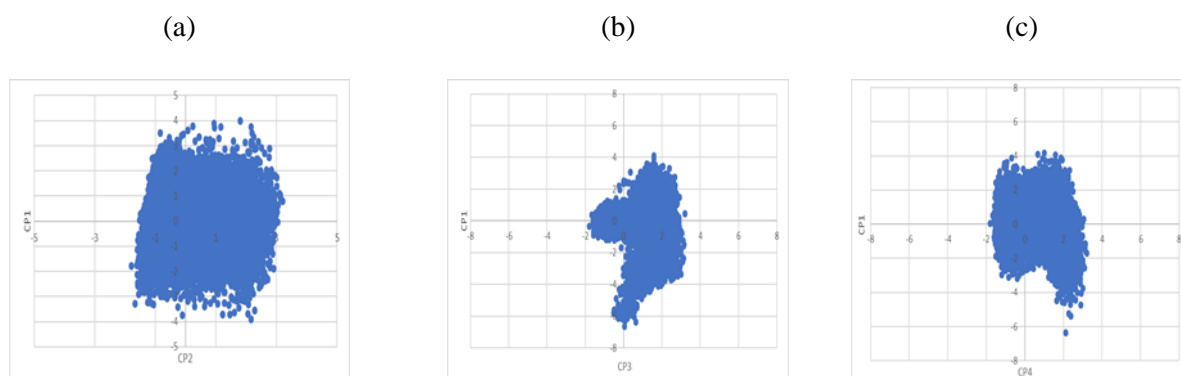


Figura 63 - Representação dos *scores* da primeira componente principal em função da segunda(a), terceira(b) e quarta(c) componente principal resultante da subtração do termograma final aos termogramas das 24 horas (BTI 0-24f)

Na Figura 64, a primeira e a segunda componentes principais apresentam valores positivos e negativos, bastante equilibrados segundo os eixos. No entanto, é possível identificar do lado negativo pontos com valores superiores em módulo nas duas componentes, visto que as imagens térmicas associadas ilustram maioritariamente diferenças negativas. A forma da mancha também é alongada, daí que a sua variabilidade também seja significativa.

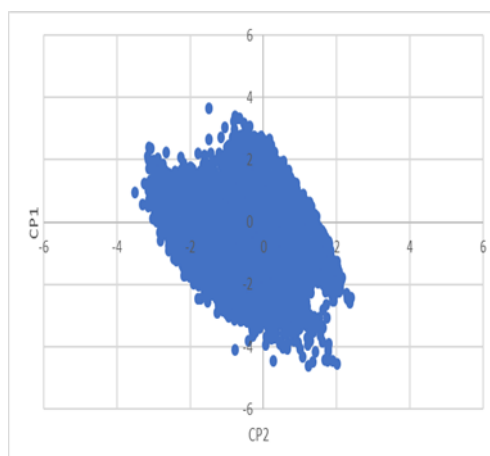


Figura 64 - Representação dos *scores* da primeira componente principal em função da segunda, resultante da subtração do termograma inicial aos termogramas das 24 horas (BTI 0-24i)

#### 5.2.4. ANÁLISE DE *LOADINGS*

A análise de *loadings* permite relacionar cada termograma com uma componente principal, identificando quais são determinantes para cada componente [20]. A Figura 65 mostra a representação dos *loadings* quando o perfil instantâneo foi o termograma final (figura 68(a)) e o termograma inicial (figura 68(b)). Fez-se a análise apenas para as primeiras 8 horas, uma vez que é o período mais relevante para o fenómeno em estudo.

A Figura 65 (a) permite concluir que tanto a primeira como a segunda componente principal apresentam coeficientes positivos para todos os termogramas, o que significa que existe uma correlação positiva entre as variáveis. Na primeira componente, percebe-se que os primeiros termogramas, correspondentes às primeiras horas de ensaio, são mais relevantes porque estão associados aos maiores coeficientes. Então, pode concluir-se que o termograma inicial é o mais importante nesta componente. Já na segunda componente principal, os últimos termogramas das primeiras oito horas estão relacionados com os coeficientes de maior valor e, por isso, o último termograma deste período é o mais significativo para esta componente.

Assim, como a CP2 representa sempre pior o fenómeno, isto significa que o que pesa são os termogramas mais afastados dos de referência, como também se verifica na Figura 65 (b).

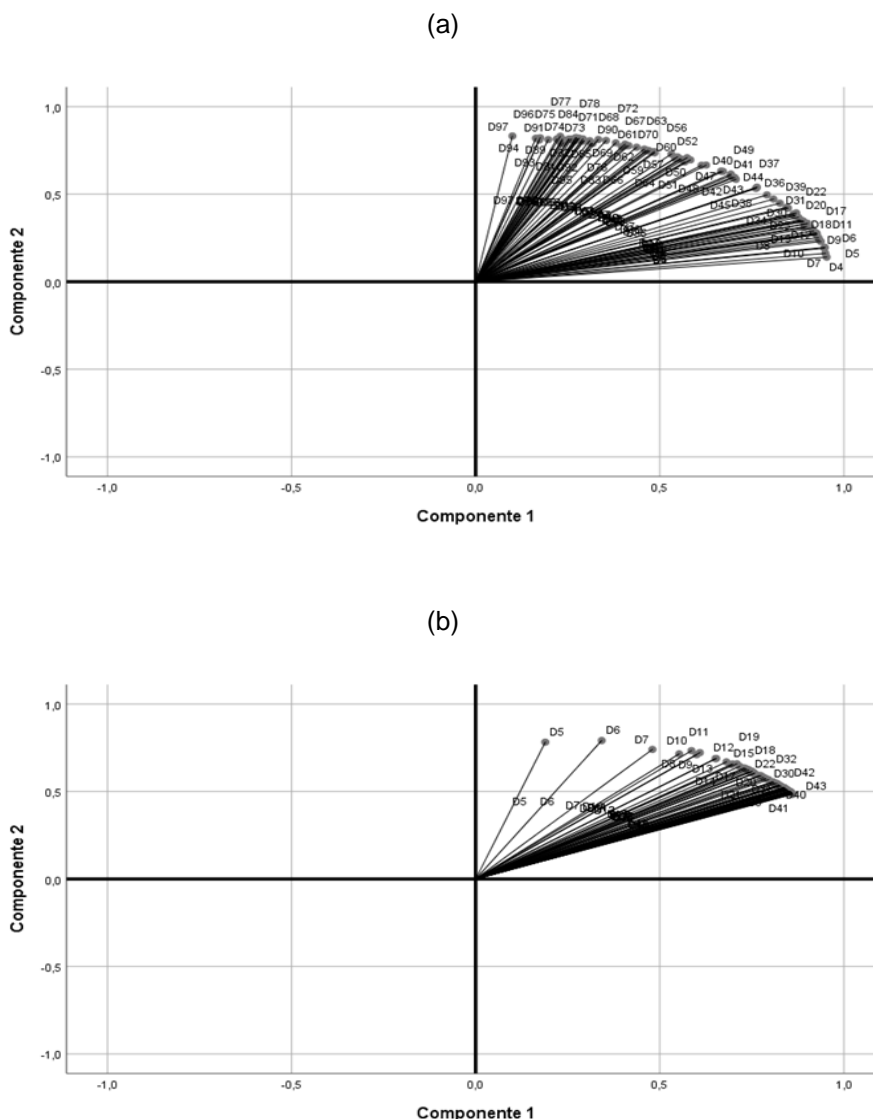


Figura 65 – Representação dos *loadings* do termograma final subtraído às primeiras 8 horas(a); do termograma inicial subtraído às primeiras 8 horas(b)

### 5.3. ABORDAGEM ESPACIAL

Esta abordagem consiste em avaliar a evolução espacial dos termogramas, com o intuito de localizar e identificar a região com maior variação térmica. Segundo Santos [20], um componente elétrico que sofre alterações térmicas devido a um aquecimento, apresenta vantagens com a aplicação desta abordagem, uma vez que a primeira componente principal permite a detecção de brilho em uma região da imagem, enquanto que as restantes áreas permanecem inalteradas nessa componente como nas restantes componentes, evidenciando a variabilidade espacial dos dados. No entanto, o provete em estudo sofre uma humedificação constante ao longo de 24 horas, ao longo de toda a sua superfície e, por isso, no final



do ensaio, na maior parte da área do provete existe água. Assim sendo, a localização espacial do defeito não se enquadra nesta análise, porque grande parte da área possui variação de temperatura.

Assim, inicialmente tentou-se transpor a matriz, o que foi apenas conseguido no *SPSS*, uma vez que o *Excel* não possui linhas suficientes para essa operação. Apesar disso, como a dimensão dos dados no modo espacial é demasiado grande, o *software* utilizado não permite o seu processamento, indicando um erro de memória insuficiente. Por isso, tentou analisar-se apenas a parte relevante da matriz, isto é, os dados relativos à base, o que também não foi possível, dado que o número de variáveis é maior do que o máximo processado pelo *software* e apenas é obtida a matriz de correlações.



## 6

### HUMIDIFICAÇÃO PELO TOPO

#### 6.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Como para a humedificação pela base, considerou-se importante perceber a variabilidade de cada instante adotado como referência. Assim, a Figura 66 evidencia que o termograma inicial T007 possui as temperaturas mais elevadas, dado que inicialmente o provete se encontrava seco e mais quente do que a temperatura ambiente. Posteriormente este fica sujeito à humedificação do seu topo ao longo de 24 horas; daí que o termograma final T193 apresente as temperaturas mais reduzidas dos três instantes em análise. Já o perfil instante médio apresenta temperaturas mais próximas do termograma final, porque as temperaturas diminuíram ao longo do ensaio, não só na zona que foi ficando mais húmida, mas também na zona seca que arrefeceu ao aproximar-se da temperatura ambiente. A presença de *outliers* no termograma inicial T007 relaciona-se com a variabilidade inicial nos valores, isto é, as temperaturas não são homogéneas e ocorrem valores extremos; já no termograma final e perfil instante médio, as temperaturas começam a estar mais relacionadas e, por esse motivo, a quantidade de *outliers* é mais reduzida.

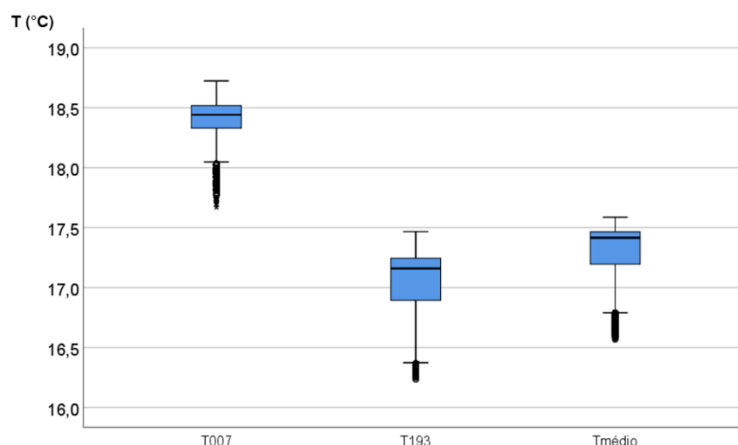


Figura 66 - Representação dos *boxplots* dos perfis instante de referência

A Figura 67 representa a variabilidade de uma posição média, no topo e na base do elemento em análise. Como o topo regista temperaturas mais reduzidas, é possível associar este facto à existência de humidade nessa posição. Já a posição da base apresenta as temperaturas mais elevadas, uma vez que a água não atingiu essa posição. Tal como na humidificação pela base, também na humidificação pelo topo o perfil posição média se aproxima mais do perfil mais húmido, neste caso, do topo. Contudo, este efeito não é tão evidente porque as temperaturas são mais semelhantes para todos os perfis.

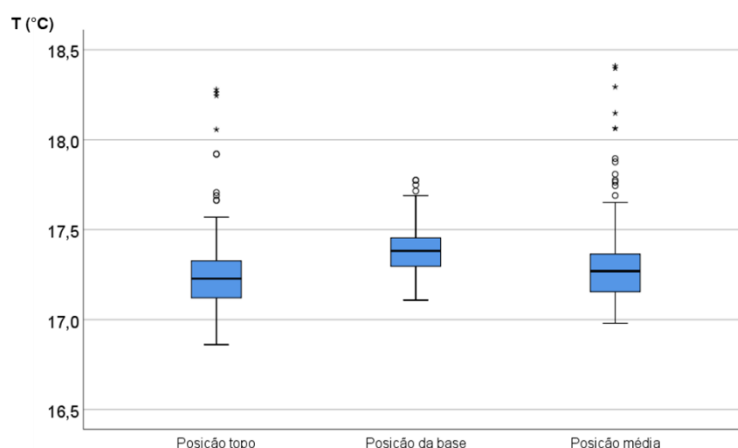


Figura 67 - Representação dos *boxplots* dos perfis posição de referência

## 6.2. ABORDAGEM TEMPORAL

### 6.2.1. SUBTRAÇÃO DO PERFIL POSIÇÃO

Como já analisado para a humedificação pela base, a subtração de uma posição do topo, da base ou média, à matriz resultante da humedificação pelo topo, são iguais, dado que essa subtração origina diferenças semelhantes. Assim, não é possível identificar diferenças significativas entre as três imagens térmicas tanto na primeira componente principal como na segunda. A Figura 68 mostra, como exemplo, as componentes principais para o caso da subtração pelo perfil posição da base. Na primeira componente, que explica grande parte da variância (Figura 69), é possível visualizar a região mais afetada pela lâmina de água no topo, assinalada com uma mancha azul, e também as restantes regiões que evidenciam a diminuição dos efeitos da água. Por isso, na base do provete é onde se observam as temperaturas mais elevadas, visto que é a zona mais seca. Na segunda componente, como a percentagem de variância explicada é reduzida, a imagem correspondente não descreve eficazmente o fenómeno da humedificação. No entanto, pode estar relacionada com o arrefecimento do provete para atingir o equilíbrio com a ambiência da câmara climática.

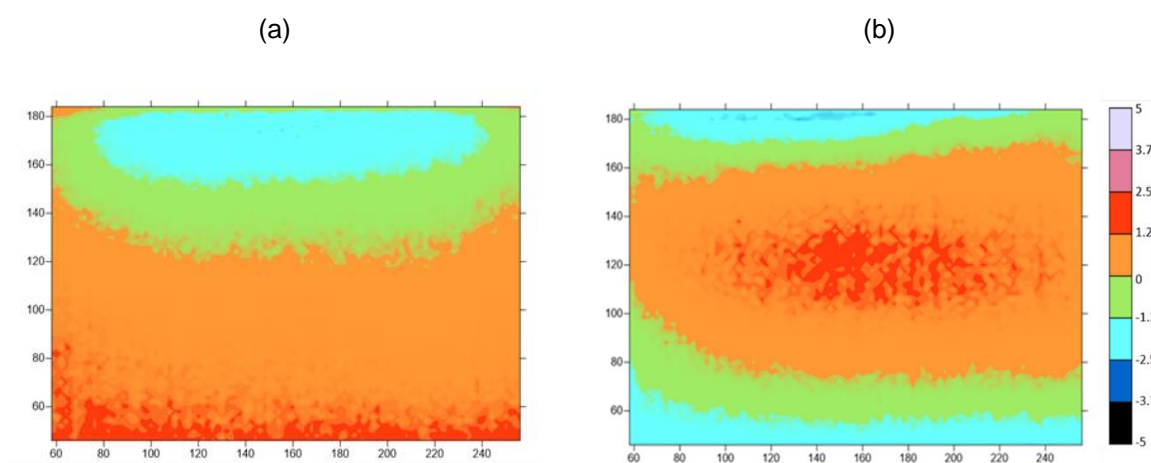


Figura 68 – CP1 (a) e CP2 (b) da subtração de uma posição da base às restantes posições (TTP<sub>b</sub>)

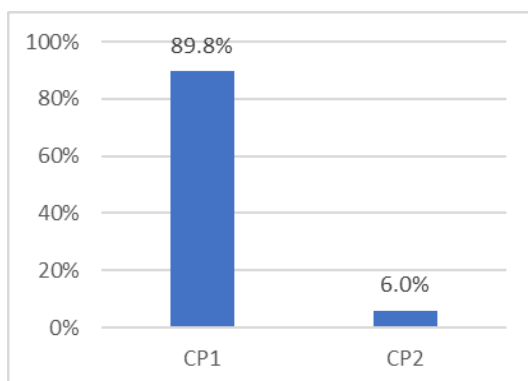


Figura 69 - Variância explicada pelas CPs (TTP<sub>b</sub>)

#### 6.2.2. SUBTRAÇÃO DO PERFIL INSTANTE

A primeira componente principal da Figura 70, relativa à subtração do termograma final, explica cerca de 56% da variância total. Ela permite identificar os diferentes níveis de humedificação resultantes da evolução ao longo do tempo, da frente húmida. As diferenças assumem valor positivo no topo, dado que no termograma final as temperaturas são mais reduzidas, comparativamente com as restantes. Na base as diferenças são negativas, devido a essa zona se encontrar seca e ter ocorrido um arrefecimento de forma a ser atingido o equilíbrio com a ambiência. As restantes componentes explicam muito pouco a variância, como se verifica na Figura 71, daí que não permitam descrever de forma eficaz o efeito da humedificação. Tal como no caso do perfil posição, também nesta situação a componente 4 parece estar relacionada com o arrefecimento do provete ao longo do tempo para atingir o equilíbrio térmico com a ambiência.

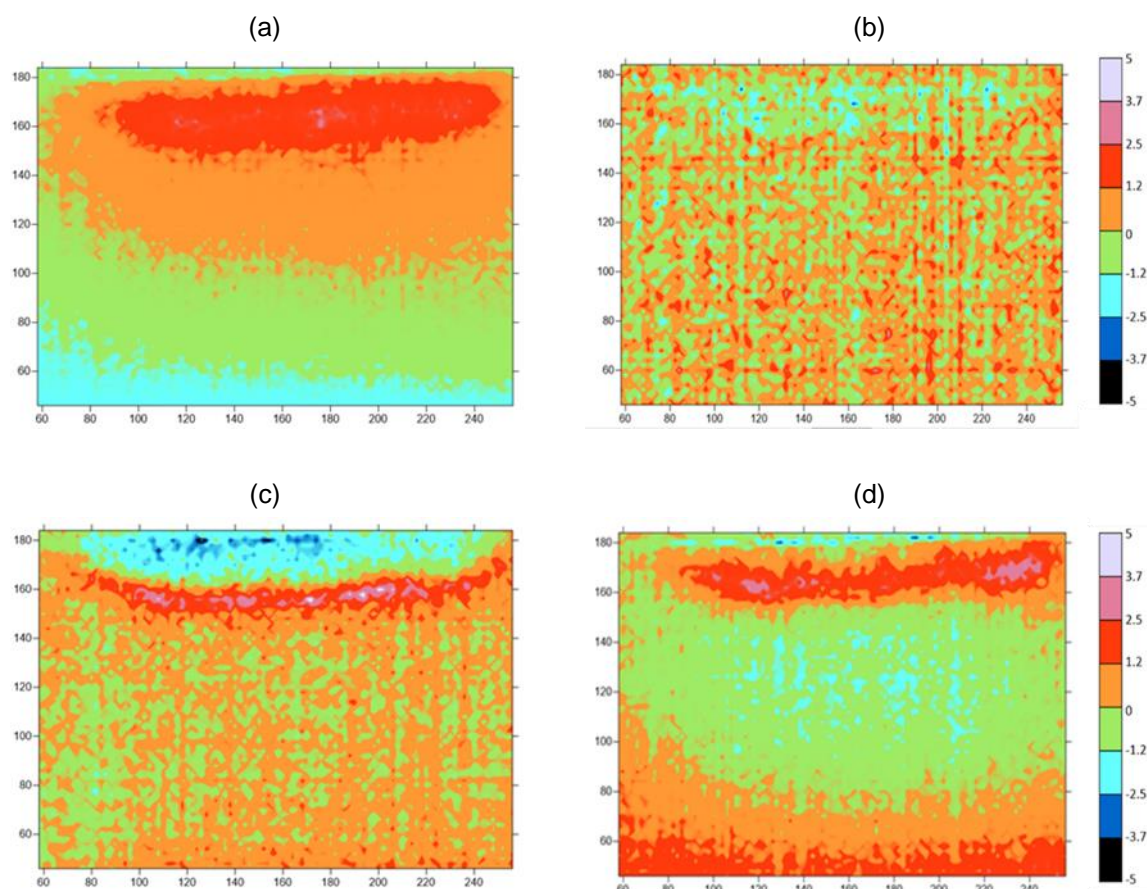


Figura 70 - CP1 (a), CP2 (b), CP3 (c) e CP4 (d) da subtração do termograma final aos termogramas das 24 horas (TTI 0-24h)

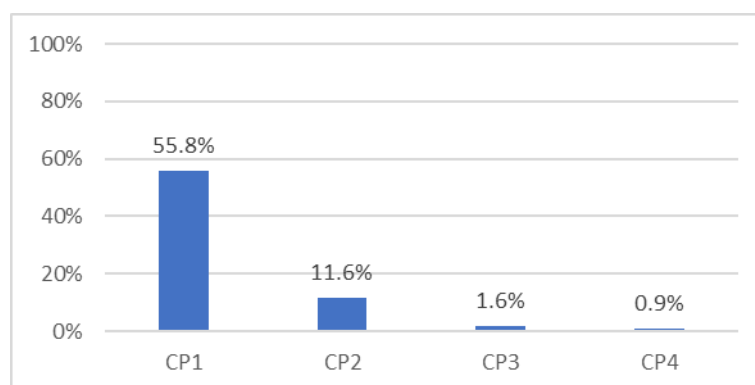


Figura 71 - Variância explicada pelas CPs (TTI 0-24h)

A primeira componente principal tem a capacidade de explicar 94% da variância (Figura 73), daí que a sua representação como imagem, na Figura 72, permita identificar a absorção de água pelo provete e os

diferentes níveis de humedificação, isto é, consegue-se observar que apesar de a lâmina de água provocar a diminuição das temperaturas no topo, o efeito da água observa-se até cerca de meia altura.

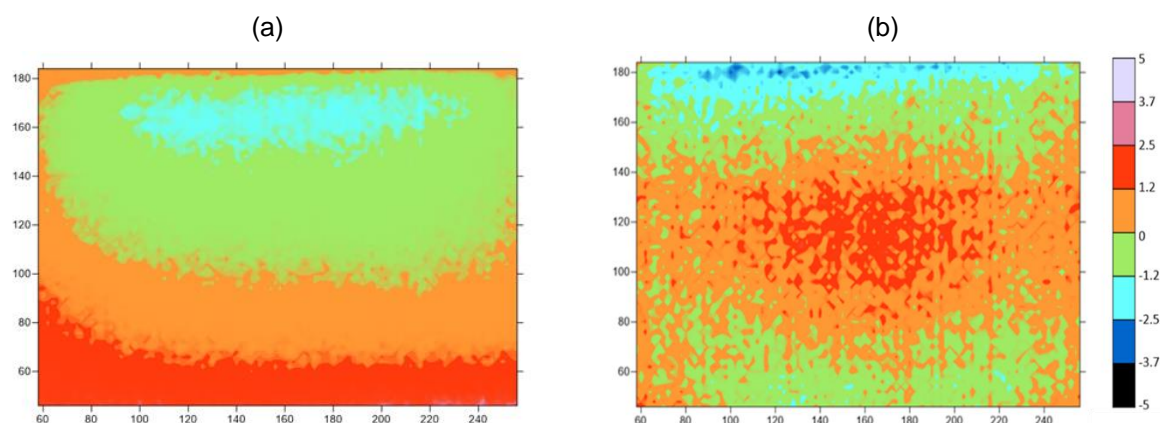


Figura 72 – CP1 (a) e CP2 (b) da subtração do termograma inicial aos termogramas das 24 horas (TTI<sub>0-24h</sub>)

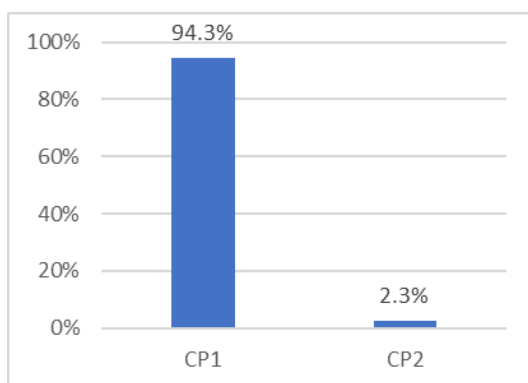


Figura 73 - Variância explicada pelas CPs (TTI<sub>0-24h</sub>)

A Figura 74 representa as componentes principais dos termogramas das primeiras 8 horas de humedificação, subtraídos pelo termograma final. A representação da primeira componente principal apenas permite identificar a região mais próxima do topo que foi afetada pela presença da água, não sendo possível visualizar os restantes níveis atingidos pela água. Já a segunda componente principal tem uma percentagem de variância muito mais reduzida (Figura 75), pelo que não traduz o fenómeno da humedificação.



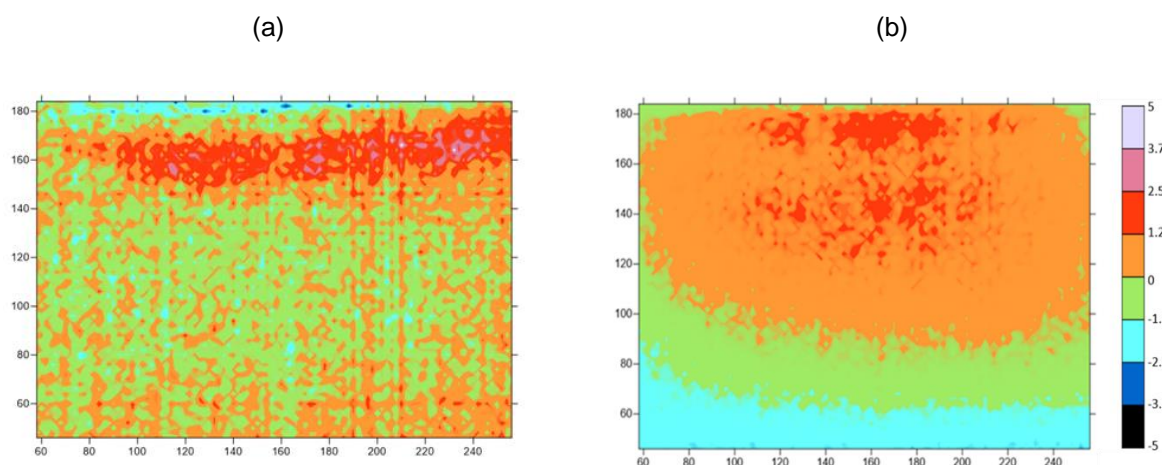


Figura 74 - CP1 (a) e CP2 (b) da subtração do termograma final aos termogramas das primeiras 8 horas (TTI 0-8h)

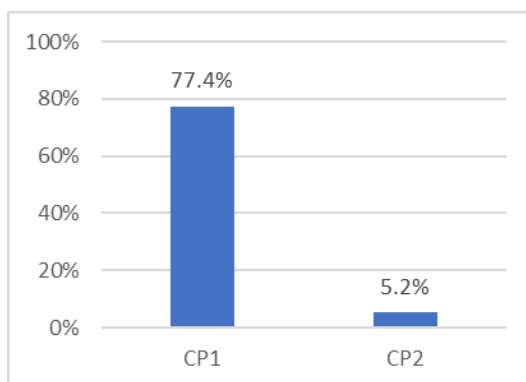


Figura 75 - Variância explicada pelas CPs (TTI 0-8h)

Quando se subtrai o perfil instantâneo inicial às primeiras 8 horas de humedificação, os resultados são mais elucidativos do fenómeno que no caso da subtração do perfil instantâneo final, uma vez que é possível observar os efeitos da absorção de água pelo provete (Figura 76). Assim, consegue-se prever onde se registaram as temperaturas mais reduzidas e consequentemente as zonas mais afetadas pela presença de água. Na primeira componente principal, representada na Figura 76(a), é evidente a zona sujeita à ação da lâmina de água, daí que essa imagem descreva perfeitamente o fenómeno. A segunda componente principal tem uma reduzida variância explicada (Figura 77), pelo que não traduz corretamente o fenómeno de humedificação.

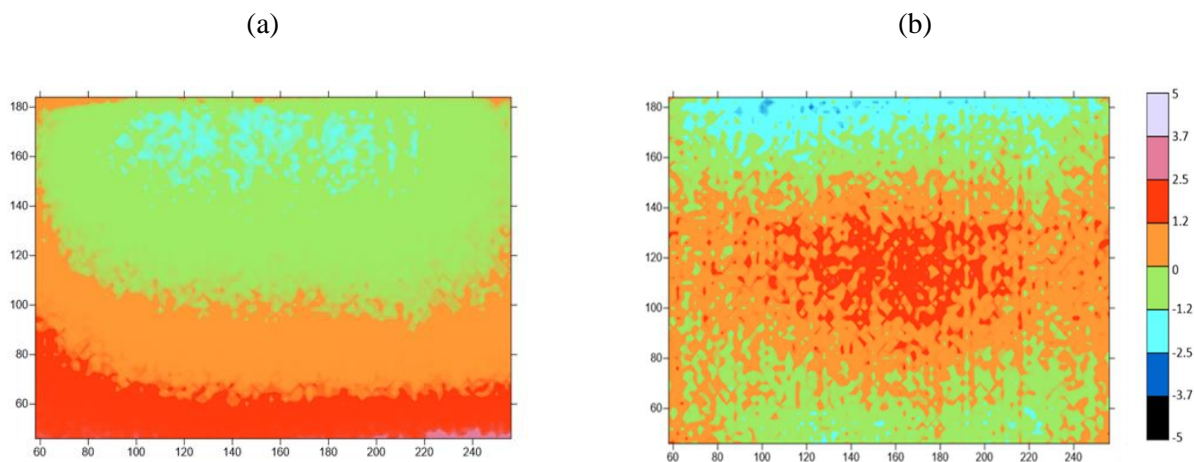


Figura 76 - CP1 (a) e CP2 (b) da subtração do termograma inicial aos termogramas das primeiras 8 horas ( $TTI_{0-8i}$ )

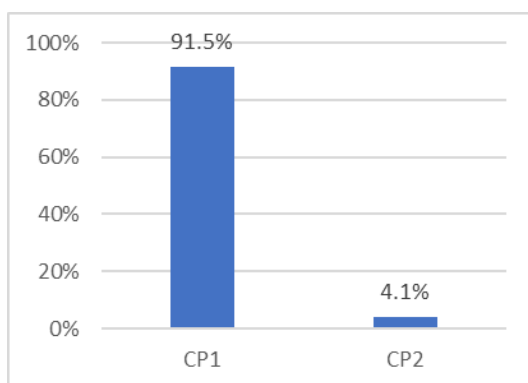


Figura 77 - Variância explicada pelas CPs ( $TTI_{0-8i}$ )

Quando se aplica a ACP às segundas 8 horas de humidificação, e se considera como referência quer o termograma final (Figura 78), quer o inicial (Figura 80), os resultados obtidos são muito semelhantes aos das primeiras 8 horas, embora a percentagem de variância explicada seja diferente nos dois casos. Quando se utiliza como referência o termograma final, a variância explicada diminui consideravelmente para as segundas 8 horas (Figura 79), o que resulta de as temperaturas já se encontrarem mais relacionadas entre si e, por isso, existir menor variabilidade dos dados. Quando se utiliza como referência o termograma inicial, a variância explicada aumenta para 98%, porque a série de dados para as segundas 8 horas difere mais do termograma inicial.

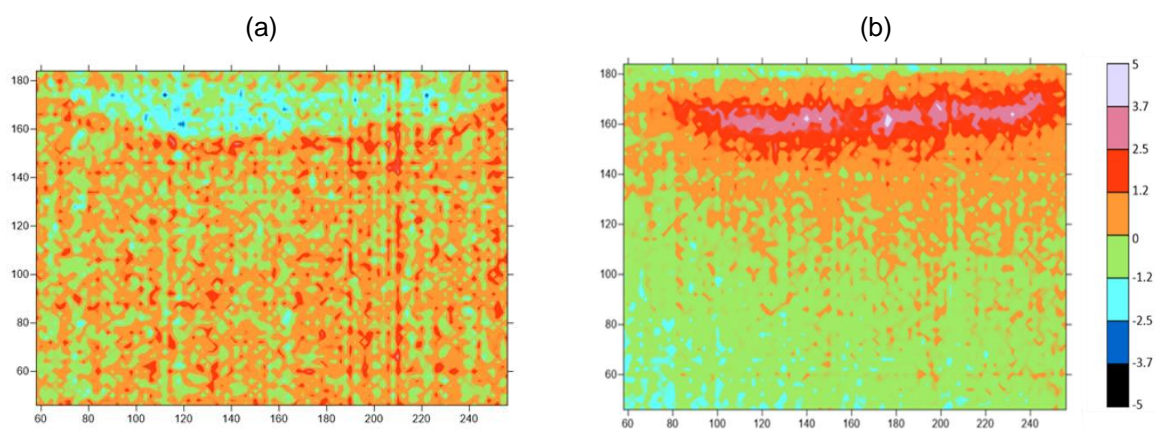


Figura 78 - CP1 (a) e CP2 (b) da subtração do termograma final aos termogramas das segundas 8 horas (TTI<sub>8-16t</sub>)

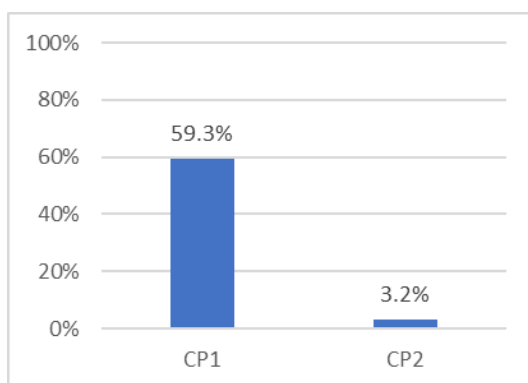


Figura 79 - Variância explicada pelas CPs (TTI<sub>8-16t</sub>)

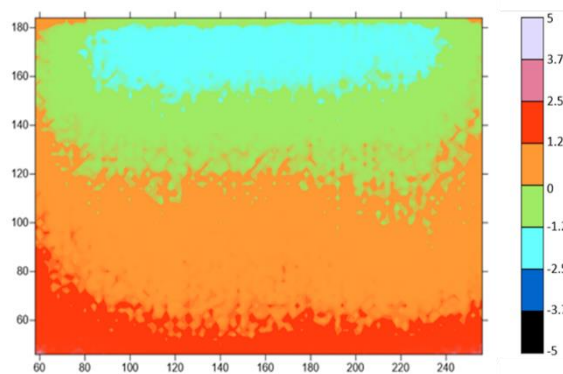


Figura 80 - CP1 da subtração do termograma inicial aos termogramas das segundas 8 horas (TTI<sub>8-16i</sub>)

A Figura 81 mostra a representação das componentes principais da subtração do perfil instante médio, aos termogramas das segundas 8 horas do período de humedificação. Embora a primeira componente principal explique um valor reduzido da variância total, na imagem que a representa consegue-se identificar a cota alcançada pela frente húmida e os diferentes níveis de humedificação. Nessa componente, as maiores variações térmicas estão associadas a diferenças negativas, o que significa que o perfil instante médio apresenta temperaturas mais elevadas do que o conjunto das segundas oito horas de ensaio. No entanto, o perfil médio não é uma boa referência, visto que no topo do provete se observam também diferenças positivas. A variância das três componentes principais é muito reduzida, como demonstra a Figura 82.

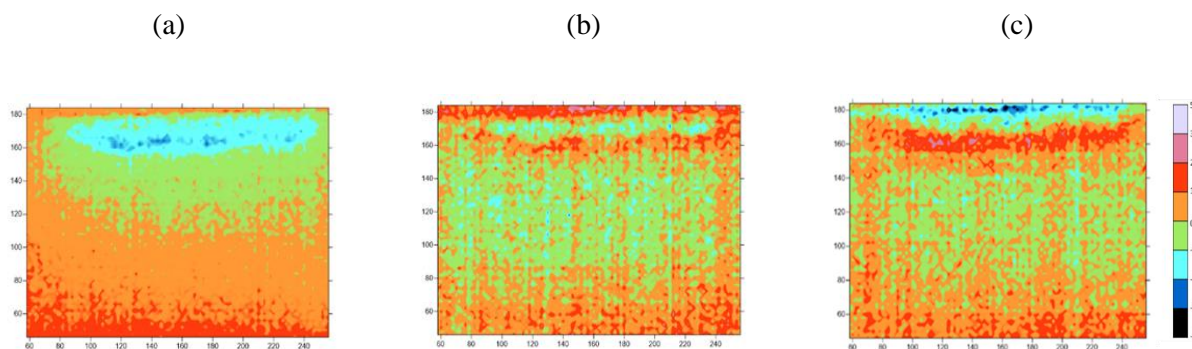


Figura 81 - CP1(a), CP2(b) e CP3 (c) da subtração do perfil instante médio aos termogramas das segundas 8 horas (TTI 8-16m)

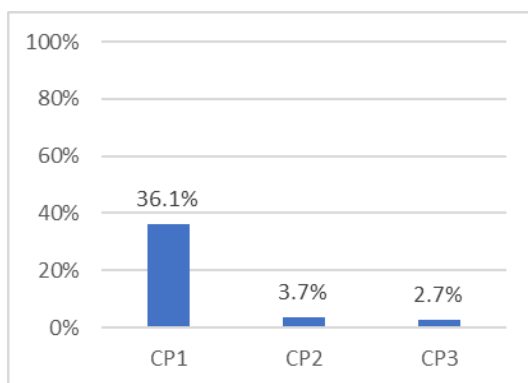


Figura 82 - Variância explicada pelas CPs (TTI 8-16m)

Da subtração do termograma final às terceiras 8 horas resulta a imagem da Figura 83, que traduz a elevada correlação das temperaturas neste intervalo de tempo e, por isso, não é possível identificar os efeitos da água, embora a variância explicada seja de 52 %.

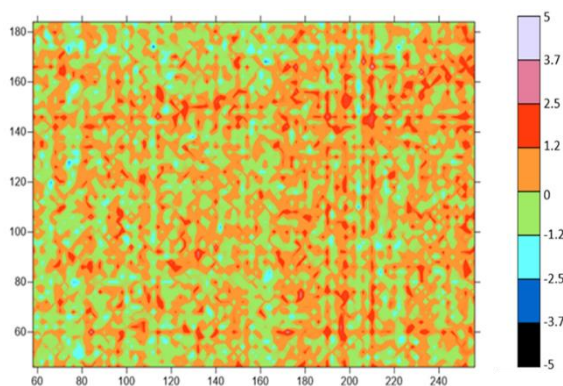


Figura 83 - CP1 da subtração do termograma final aos termogramas das terceiras 8 horas (TTI<sub>16-24f</sub>)

A Figura 84 representa a única componente principal resultante da aplicação da ACP à diferença entre o termograma inicial e os termogramas das terceiras 8 horas. Para este caso, a variância explicada é de 98%, daí que a imagem traduza de forma eficaz o fenómeno da humedificação e permita identificar as áreas mais húmidas. As áreas sujeitas a uma maior variação de temperaturas encontram-se associadas às diferenças negativas, uma vez que o termograma inicial se encontra mais seco do que os termogramas respeitantes às últimas horas de ensaio.

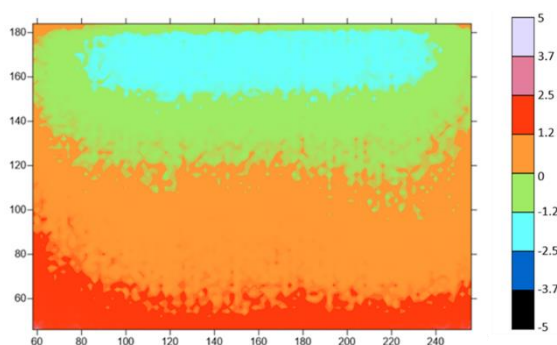


Figura 84 - CP1 da subtração do termograma inicial aos termogramas das terceiras 8 horas (TTI<sub>16-24i</sub>)

Na subtração do perfil instante médio às terceiras 8 horas de ensaio (Figura 85), a única componente principal obtida consegue explicar 61 % de variância, o que permite identificar as áreas afetadas pela



presença de água no topo do provete, assim como distinguir as zonas mais humidificadas das restantes. Estas áreas também são representadas por diferenças negativas, uma vez que o perfil instantâneo médio possui valores de temperatura mais elevados do que as temperaturas dos termogramas obtidos nas últimas 8 horas de ensaio.

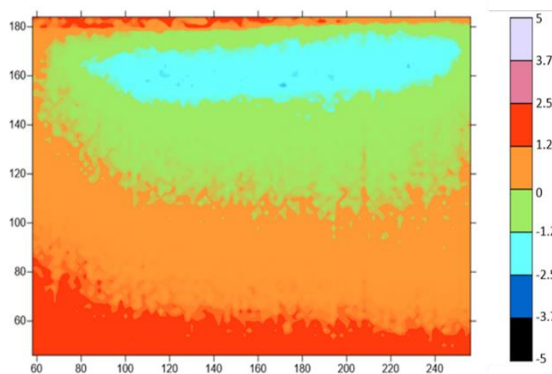


Figura 85 - CP1 da subtração do perfil instantâneo médio aos termogramas das terceiras 8 horas (TTI 16-24m)

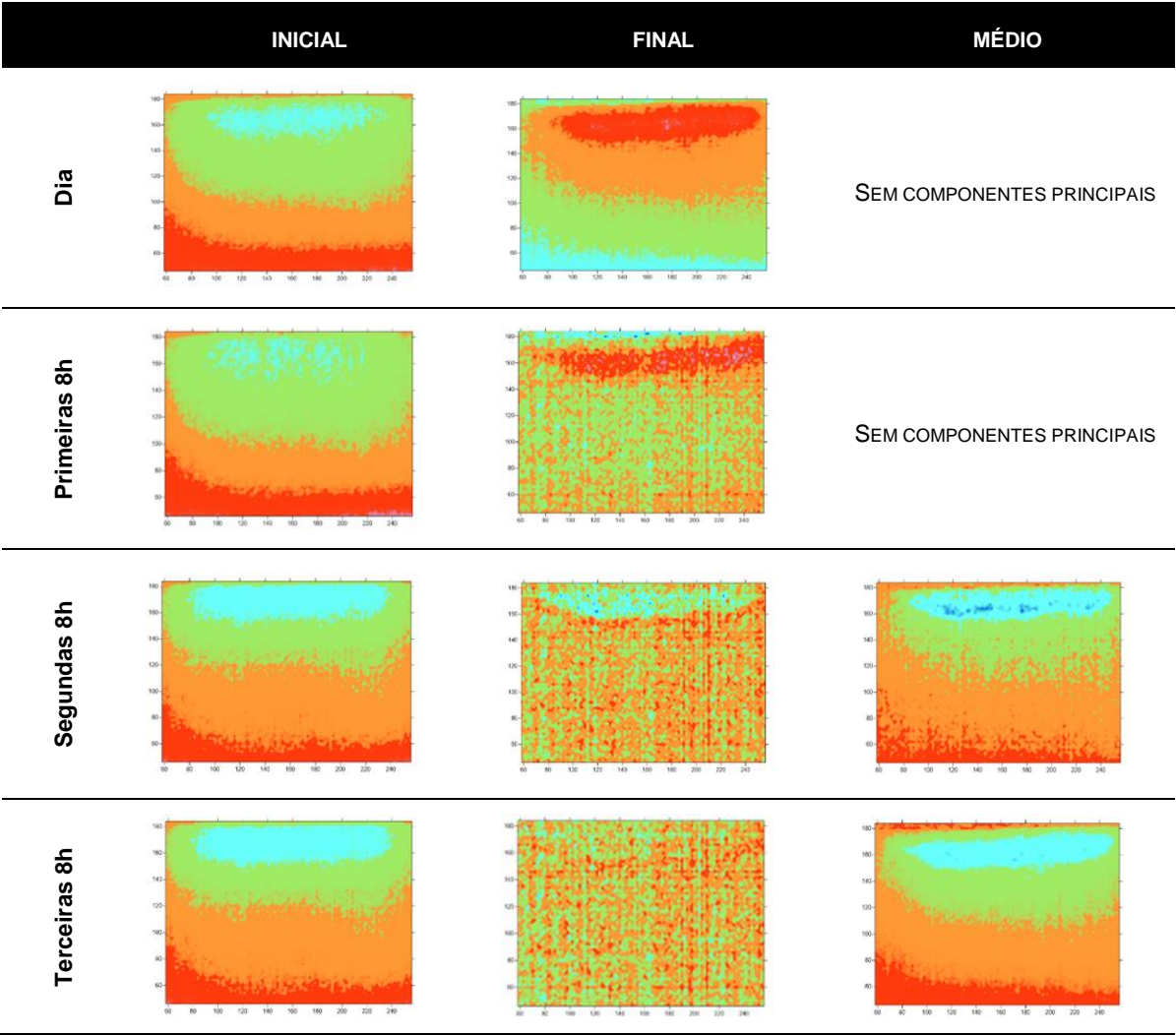
Pelo Quadro 3 é possível perceber que, pela subtração do termograma inicial aos termogramas resultantes de todo o período de ensaio, consegue-se identificar as áreas afetadas pela água absorvida, bem como os diferentes níveis de humidificação. Já nas primeiras, segundas e terceiras 8 horas, as imagens resultantes da respetiva subtração do termograma inicial permitem visualizar o crescimento gradativo da mancha húmida, dado que no fim do ensaio é quando se identifica uma humidificação mais intensa devido à lâmina de água no topo. No entanto, em comparação com a primeira componente principal resultante da aplicação da ACP aos resultados da humidificação pela base, a mancha húmida assume neste caso uma área menor, o que é justificado pelo facto de a lâmina de água na base do provete promover uma melhor absorção, uma vez que durante o ensaio 5 faces se mantiveram em contacto com a água, enquanto que na humidificação pelo topo, apenas uma.

A subtração do termograma final aos termogramas de um dia de ensaio também permite reconhecer os efeitos da água, isto é, é possível distinguir as áreas que sofreram variações de temperatura devido à humidade. As zonas mais húmidas estão representadas com diferenças de valor oposto às originadas pela subtração do termograma inicial, visto que o termograma final possui temperaturas mais reduzidas do que a série de dados. Já para os períodos das primeiras, segundas e terceiras 8 horas, as imagens térmicas não permitem evidenciar o fenómeno da humidificação de uma forma eficaz.

O perfil médio não permite obter componentes principais quando subtraído a um dia de ensaio e às primeiras 8 horas e, por isso, entende-se que este perfil não é adequado enquanto perfil instantâneo de referência para este tipo de fenómeno. No entanto, nas terceiras 8 horas, ao subtrair este termograma consegue-se identificar as zonas afetadas pela humidificação, bem como os diferentes níveis de

humidificação, permitindo localizar as maiores variações de temperatura ocorridas no provete. Tendo em conta que a imagem obtida quando o perfil médio é utilizado, é semelhante à obtida quando a referência é o termograma inicial, é possível afirmar que o perfil médio se aproxima mais do termograma inicial nesse período de tempo.

Quadro 3 – Primeira componente principal considerando todos os perfis instante da humidificação pelo topo



Semelhante à humificação pela base, quando se considera qualquer uma das posições como referência, as suas componentes também são idênticas e conseguem explicar a maior parte da variância; a primeira componente principal explica bem o fenómeno da humidificação no domínio temporal, como se verifica no Quadro 2.

Na adoção do termograma inicial como referência, como acontece na humidificação pela base, obtém-se um número mais reduzido de componentes principais, quando comparado com as restantes referências. No entanto, apresenta a maior variância explicada e, como já analisado, esta referência é a que descreve melhor o fenómeno, dado que o seu termograma apresenta maior variabilidade e, por isso, não existe tanta correlação entre os valores das temperaturas.

O termograma final, no caso da humidificação pelo topo, revelou-se ser uma referência não adequada para descrever o fenómeno, uma vez que as suas componentes explicam uma percentagem muito reduzida de variância, excepto quando subtraída às primeiras 8 horas de humidificação, uma vez que é o intervalo mais significativo para a humidificação.

Já quando considerado o perfil médio como referência, não resultam componentes principais para todo o período de ensaio e para as primeiras 8 horas, o que revela que este termograma não deve ser considerado na análise. No entanto, nas segundas e terceiras 8 horas, embora o valor da percentagem explicada seja reduzido, as suas componentes principais, representadas por uma imagem, conseguem descrever o fenómeno.

Quadro 4 – Número de componentes principais e respetiva variância explicada

	Número de componentes principais (CPs)	% de variância explicada
<b>TTP<sub>b</sub></b>	2	95,81
<b>TTP<sub>m</sub></b>	2	95,81
<b>TTP<sub>t</sub></b>	2	95,81
<b>TTI<sub>0-24f</sub></b>	4	69,93
<b>TTI<sub>0-24i</sub></b>	2	96,60
<b>TTI<sub>0-24m</sub></b>	-	-
<b>TTI<sub>0-8f</sub></b>	2	82,65
<b>TTI<sub>0-8i</sub></b>	2	95,60
<b>TTI<sub>0-8m</sub></b>	-	-
<b>TTI<sub>8-16f</sub></b>	2	62,54
<b>TTI<sub>8-16i</sub></b>	1	97,90
<b>TTI<sub>8-16m</sub></b>	3	42,40
<b>TTI<sub>16-24f</sub></b>	1	52,10
<b>TTI<sub>16-24i</sub></b>	1	98,28
<b>TTI<sub>16-24m</sub></b>	1	60,78



Como na humidificação pela base, aplicou-se a análise de componentes principais ao conjunto de termogramas originais resultantes da humidificação pelo topo, obtendo-se duas imagens relativas às duas primeiras componentes principais (Figura 86). Na primeira componente é possível reconhecer as áreas associadas ao efeito da água. No topo, em contacto com a lâmina de água, registam-se as temperaturas mais reduzidas, aumentando gradualmente o seu valor até à base, onde se encontram valores das temperaturas mais elevados. Na segunda componente principal, as diferenças associadas à imagem térmica representam padrões que não se devem à humidificação. Eventualmente, poderão estar relacionados com o arrefecimento do provete até ser alcançado o equilíbrio térmico.

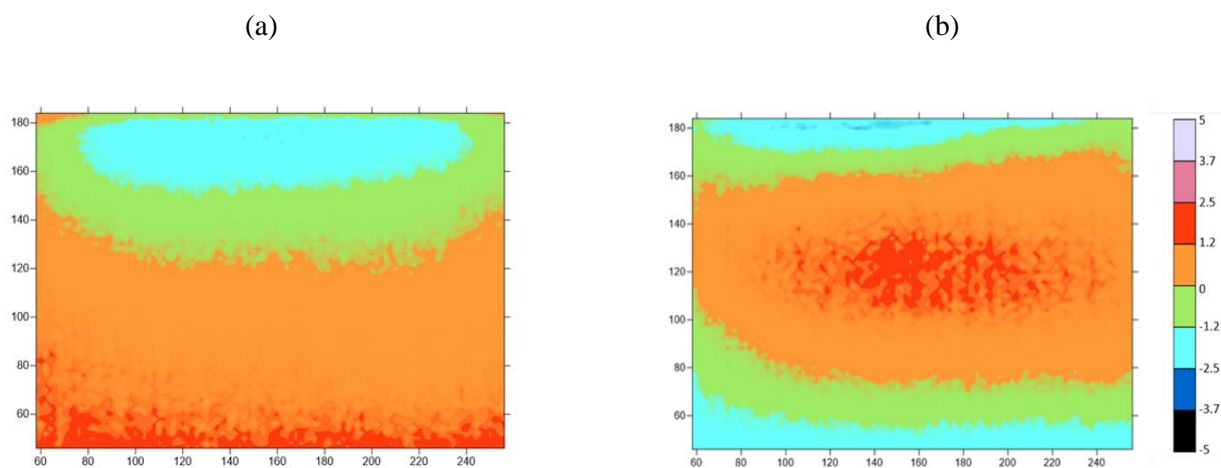


Figura 86 - CP1 (a) e CP2 (b) da ACP aplicada aos termogramas originais

### 6.2.3. ANÁLISE DE SCORES

Como as imagens das componentes principais são semelhantes, a representação dos *scores* da subtração de uma posição média, da base ou do topo, às restantes, também é a idêntica. Na Figura 87 representam-se como exemplo os *scores* da primeira componente principal em função da segunda, resultante da subtração da posição base. Observa-se que na primeira componente principal, segundo o eixo dos xx, o aglomerado de valores negativos é significativamente superior aos valores positivos; por isso, na representação destes valores em uma imagem, consegue-se visualizar maioritariamente as diferenças negativas. Segundo o eixo dos yy, na segunda componente principal, existem valores com maior valor absoluto, do lado negativo do eixo, o que está relacionado com a predominante representação de diferenças negativas no seu mapa de cores.

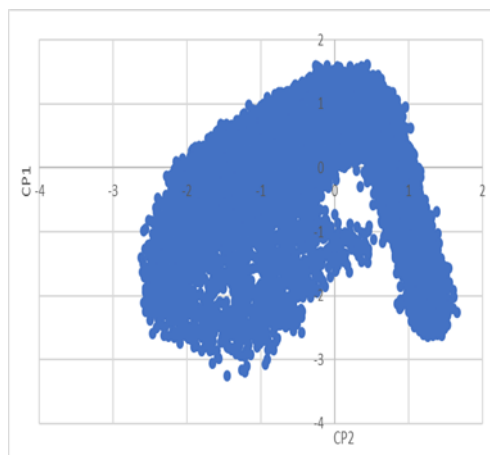


Figura 87 - Representação dos scores da primeira componente principal em função da segunda, resultante da subtração da posição base às restantes posições (TTI<sub>b</sub>)

A Figura 88 representa os *scores* da primeira componente principal em função das restantes três, quando se subtrai o termograma final à série total de dados. Em geral, a mancha de valores obtida na Figura 88 (a), é pouco dispersa e muito concentrada nos eixos, o que revela reduzida variabilidade dos valores, devido ao intervalo de variação das componentes ser muito semelhante.

O aglomerado de valores da Figura 88 (b) é significativamente mais disperso do que no caso da Figura 88 (a), uma vez que a sua forma é mais alongada devido à terceira componente principal possuir um intervalo de variação de valores mais alargado. Na Figura 88 (c), a mancha é dispersa e sem forma conhecida, o que demonstra a variabilidade nos valores dos *scores* das duas componentes.

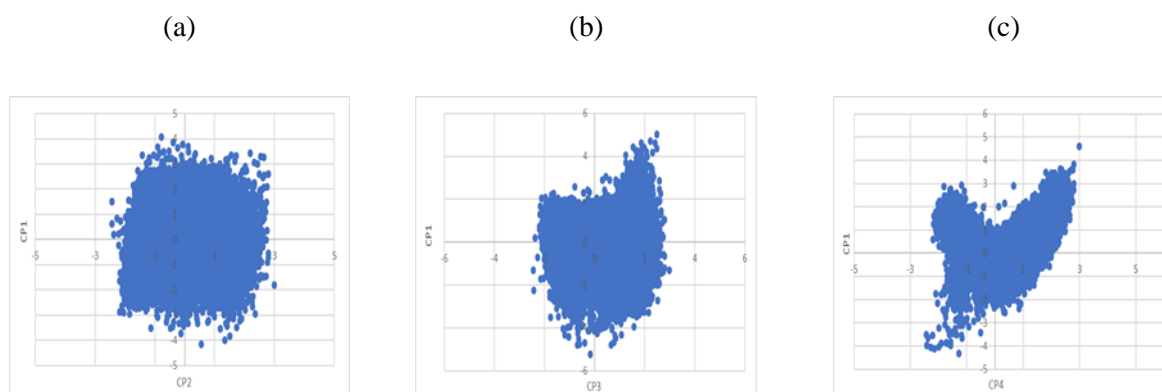


Figura 88 - Representação dos *scores* da primeira componente principal em função da segunda(a), terceira(b) e quarta(c), resultante da subtração do termograma final aos termogramas das 24 horas (TTI<sub>0-24h</sub>)

A primeira componente principal da Figura 89 apresenta um conjunto de valores do lado positivo, com maior valor absoluto do que do lado negativo, daí que se verifique uma área de diferenças positivas significativa, na metade inferior da imagem térmica dessa componente. Na segunda componente principal, acontece o contrário e, por isso, na sua imagem é possível associar esse conjunto de valores, com maior valor absoluto do lado negativo, a uma área. Assim, devido à variabilidade do intervalo de valores dos *scores*, a mancha é alongada e sem forma constante.

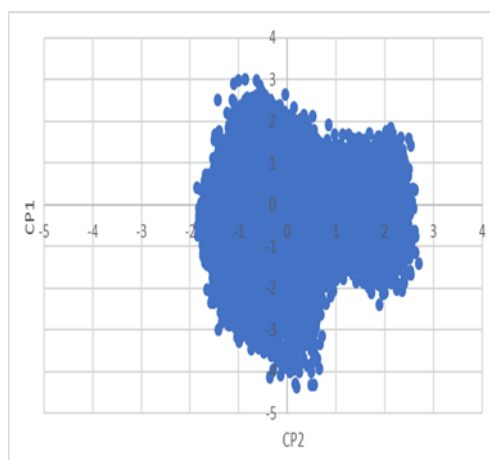


Figura 89 - Representação dos *scores* da primeira componente principal em função da segunda, resultante da subtração do termograma inicial aos termogramas das 24 horas (TTI 0-24i)

#### 6.2.4. ANÁLISE DE *LOADINGS*

Na Figura 90, também se encontram apenas representados os valores dos *loadings* das primeiras 8 horas, como na humidificação pela base, quando o perfil instantâneo foi o termograma final (Figura 90 (a)) e o termograma inicial (Figura 90 (b)). A Figura 90 (a) permite verificar que tanto a primeira, como a segunda componente principal, também possuem coeficientes positivos para todos os termogramas, o que significa que em cada componente as suas variáveis se encontram todas correlacionadas entre si. Na primeira componente, percebe-se que, ao contrário da humidificação pela base, os últimos termogramas, das primeiras horas de ensaio, são mais significativos, porque estão associados aos maiores coeficientes. Por isso, assume-se que o termograma final é o mais importante nesta componente. Na segunda componente principal, os primeiros termogramas das primeiras 8 horas estão relacionados com os coeficientes de maior valor, o que significa que estes contribuem mais para esta componente. Na Figura 90 (b), os coeficientes dos *loadings*, na segunda componente principal, são todos positivos e, por isso, as suas variáveis estão correlacionadas; já na primeira componente principal apenas o primeiro termograma possui correlação negativa com os restantes. Na primeira componente principal, os últimos termogramas possuem os maiores coeficientes, daí que sejam os termogramas com maior contribuição.

No entanto, para a segunda componente principal, não é o termograma inicial que tem mais significância, uma vez que o valor do coeficiente do terceiro termograma (T010) é superior aos restantes.

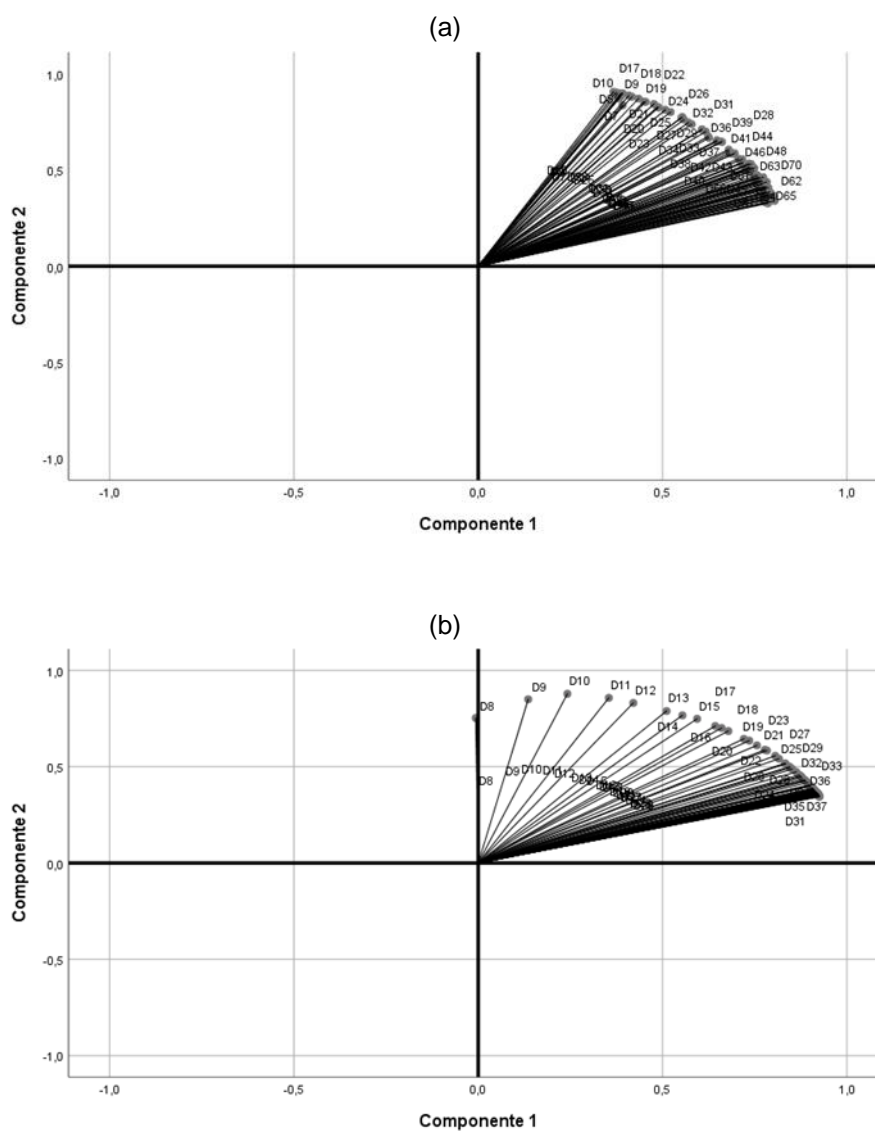


Figura 90 - Representação dos *loadings* do termograma final subtraído às primeiras 8 horas(a); do termograma inicial subtraído às primeiras 8 horas(b)

# 7

## CONCLUSÕES

### 7.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou um estudo e avaliação da utilização da técnica estatística multivariada, a Análise de Componentes Principais (ACP), como definido nos objetivos. Foi possível extrair as seguintes conclusões:

- Uma análise estatística prévia de uma série de termogramas é fundamental, porque permite observar a tendência da variação da temperatura e perceber quais os termogramas a excluir devido a perturbações não acauteladas e que, por isso, não se devem incluir na análise de componentes principais.
- A análise dos termogramas através de *boxplots* possibilitou uma melhor compreensão sobre as oscilações de temperatura, assim como uma identificação dos períodos onde a variação é mais acentuada. Além disso, foi possível constatar que a humidificação pela base é um processo mais eficiente do que pelo topo, uma vez que os valores das temperaturas observadas nos respetivos termogramas da base são mais reduzidos.
- A análise de componentes principais (ACP) provou ser uma técnica com capacidade para evidenciar os padrões térmicos de um conjunto de imagens, através da redução de todas as informações da totalidade dos termogramas em apenas um mapa de cores. Esta análise aplicada a este estudo provou que toda a informação relevante é concentrada na primeira componente principal (CP1), isto é, a maior parte dos termogramas possui temperaturas que se encontram representadas na CP1; já um número mais reduzido de termogramas tem informações relacionadas com a CP2. Para além disso, observou-se que a percentagem de variância explicada pela segunda e restantes componentes é mais reduzida; no entanto, essas componentes, por vezes, registam diferenças de temperatura mais elevadas do que as restantes.
- Na abordagem temporal, quando se pretende definir o nível de humidificação de um provete, a referência mais indicada é o termograma inicial; já para perceber quais os intervalos mais significativos na análise, deve usar-se o termograma final como referência. O perfil médio, por vezes não é uma boa indicação para descrever o fenómeno.
- A abordagem espacial não se aplica a este estudo, porque a humidificação do provete pela base e pelo topo origina uma macha húmida pouco delimitada.

- De um modo geral, conclui-se que as técnicas de tratamento aplicadas a este estudo contribuem para a complementação da termografia de infravermelhos.

## **7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

Com o presente trabalho pretendeu-se evidenciar a contribuição da análise de componentes principais como técnica de análise quantitativa da termografia de infravermelhos e, por isso, de seguida expõem-se algumas propostas para trabalhos futuros:

- Aplicação da ACP, de acordo com as técnicas abordadas no presente trabalho, aos termogramas resultantes da fase de secagem;
- Maior controlo das condições em que se realizam os ensaios, pois os fatores externos têm influência direta e significativa nas medições, o que compromete a interpretação de resultados;
- Análise espacial dos termogramas de forma profunda, com outro tipo de mancha de humidade delimitada, mais adequada a este tipo de abordagem.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Grinzato, E., G. Cadelano, and P. Bison, *Moisture map by IR thermography*. Journal of Modern Optics, 2010. **57**(18): p. 1770-8.
2. Lerma, J.L., M. Cabrelles, and C. Portales, *Multitemporal thermal analysis to detect moisture on a building facade*. Construction & Building Materials, 2011. **25**(5): p. 2190-7.
3. Barreira, E. and V.P. de Freitas, *Evaluation of building materials using infrared thermography*. Construction and Building Materials, 2007. **21**(1): p. 218-224.
4. Qingju, T., et al., *Quantitative detection of defects based on Markov-PCA-BP algorithm using pulsed infrared thermography technology*. Infrared Physics & Technology, 2016. **77**: p. 144-8.
5. Incropera, F.P., et al., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 2006.
6. Cabello, R., et al., *Infrared thermography as a useful tool to improve learning in heat transfer related subjects*. International Journal of Engineering Education, 2006. **22**(2): p. 373-80.
7. Clemente Ibarra-Castanedo, M.G., Jean-Marc Piau, and A.B.a.X.P.V.M. Stéphane Guibert, *Active infrared thermography techniques for the non destructive testing of materials*. 2007.
8. Carlomagno, G.M. and G. Cardone, *Infrared thermography for convective heat transfer measurements*. Experiments in Fluids, 2010. **49**(6): p. 1187-218.
9. Edis, E., I. Flores-Colen, and J. de Brito, *Passive thermographic detection of moisture problems in facades with adhered ceramic cladding*. Construction and Building Materials, 2014. **51**: p. 187-97.
10. Milovanovic, B., I. Banjad Pecur, and N. Stirmer, *The methodology for defect quantification in concrete using IR thermography*. Journal of Civil Engineering and Management, 2017. **23**(5): p. 573-82.
11. Rajic, N., *Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterisation in composite structures*. Composite Structures, 2002. **58**(4): p. 521-8.
12. Edis, E., I. Flores-Colen, and J. De Brito, *Time-dependent passive building thermography for detecting delamination of adhered ceramic cladding*. Journal of Nondestructive Evaluation, 2015. **34**(3): p. 24 (16 pp.).
13. Ferreira, J.P.B., *A Termografia de Infravermelhos na Avaliação de Fenómenos de Humidificação e Secagem*. 2016, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

14. Edis, E., I. Flores-Colen, and J. de Brito, *Quasi-quantitative infrared thermographic detection of moisture variation in facades with adhered ceramic cladding using principal component analysis*. Building and Environment, 2015. **94**(P1): p. 97-108.
15. Rebelo, D.F.F., *Avaliação quantitativa dos resultados da termografia de infravermelhos aplicada ao estudo da humidade* 2017, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
16. Swita, R. and Z. Suszyjski, *Processing of thermographic sequence using Principal Component Analysis*. Measurement Automation Monitoring, 2015. **61**(6): p. 215-18.
17. Griefahn, D., J. Wollnack, and W. Hintze, *Principal component analysis for fast and automated thermographic inspection of internal structures in sandwich parts*. Journal of Sensors and Sensor Systems, 2014. **3**(1): p. 105-111.
18. Marinetti, S., et al. *Statistical analysis of IR thermographic sequences by PCA*. in *7th International Workshop on Advanced Infrared Technology and Applications*, 9-11 Sept. 2003. 2004. Netherlands: Elsevier.
19. Marinetti, S., L. Finesso, and E. Marsilio, *Matrix factorization methods: Application to thermal NDT/E*. NDT&E International, 2006. **39**(8): p. 611-16.
20. Santos, G.L.d., *Análise e extração de caraterísticas de imagens termográficas utilizando componentes principais* 2010, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.
21. Marôco, J., *Análise Estatística com utilização do SPSS* 2010.
22. Ramos, N., *A importância da inércia higroscópica no comportamento higrotérmico dos edifícios* 2007, Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.